

USO DE ARRUELAS COM MEMÓRIA DE FORMA EM FLANGES DE CONECTORES SUBMARINOS

Paula Kozlowski Pitombeira Reis

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia de Petróleo da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro de Petróleo.

Orientador: Theodoro Antoun Netto

Co-orientador: Paulo Cesar da Camara Monteiro Junior

RIO DE JANEIRO

Abril de 2013

USO DE ARRUELAS COM MEMÓRIA DE FORMA EM FLANGES DE
CONECTORES SUBMARINOS

Paula Kozlowski Pitombeira Reis

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO
DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO DA ESCOLA POLITÉCNICA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
ENGENHEIRO DE PETRÓLEO.

Examinado por:



Prof. Theodoro Antoun Netto, PhD



Paulo Cesar da Camara Monteiro Junior, D. Sc.



Prof. Ilson Paranhos Pasqualino, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ-BRASIL

Abril de 2013

Reis, Paula Kozlowski Pitombeira

Uso de Arruelas com Memória de Forma em Flanges de Conectores Submarinos/ Paula Kozlowski Pitombeira Reis – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2013.

XXI, 65 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Theodoro Antoun Netto

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia de Petróleo, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 66-67.

1. Conexão Flangeada. 2. Ligas com Memória de Forma. 3. Simulação Numérica. I. Netto, Theodoro Antoun. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia de Petróleo. II. Título.

Agradecimentos

Ao meu orientador, Theodoro Antoun Netto e ao meu co-orientador, Paulo Cesar da Camara Monteiro Junior, pela transmissão de conhecimento, ajuda e incentivo ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

À toda equipe do LTS e à Cássia pelo suporte durante as etapas que envolveram o desenvolvimento do trabalho.

Ao Leonardo Malouf e à minha família pelo apoio e compreensão ao longo dos cinco anos de graduação.

À Petrobras por financiar os recursos humanos envolvidos neste trabalho através do PRH-35.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro de Petróleo.

USO DE ARRUELAS COM MEMÓRIA DE FORMA EM FLANGES DE CONECTORES SUBMARINOS

Paula Kozlowski Pitombeira Reis

Abril/2013

Orientador: Theodoro Antoun Netto

Curso: Engenharia de Petróleo

Conexões flangeadas são empregadas extensivamente no processo de produção de petróleo, unindo segmentos de tubulação, tanto entre si quanto a equipamentos diversos. O procedimento convencional de montagem deste tipo de conexão, por meio de torqueamento dos estojos, induz a cargas dissimilares ao longo do flange, o que pode levar a estrutura a falhas. Buscar alternativas ao método de aplicação de carga nos estojos é, portanto, fundamental para aumento da confiabilidade neste tipo de conexão. Este trabalho propõe um novo procedimento de aplicação de carga nos estojos por meio do uso de arruelas com memória de forma. Um modelo numérico de conexão flangeada foi desenvolvido para realizar simulações computacionais do método proposto, em conjunto com um modelo matemático que descreve o comportamento de ligas com memória de forma. A influência da geometria e da temperatura de aquecimento das arruelas na tração obtida nos estojos foi analisada. Analisou-se também a distribuição de carga nos estojos obtida com o método proposto, comparando-a com o procedimento tradicional de montagem.

Palavras-chave: Conexões Flangeadas; Ligas com Memória de Forma; Modelo Computacional.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Petroleum Engineer.

USING SHAPE MEMORY ALLOY WASHERS IN SUBSEA FLANGED CONNECTIONS

Paula Kozlowski Pitombeira Reis

April/2013

Advisor: Theodoro Antoun Netto

Course: Petroleum Engineering

Flanged connections are widely used in the oil production process, uniting tubing sections together, and tubing sections to a variety of equipment. The conventional mounting procedure of this type of connection, by torqueing the studs, induces uneven values of stress around the flange, and that can lead the structure to failure. Therefore, searching for new alternative ways to tighten the flange studs is fundamental, in order to increase the reliability on this type of connection. This work proposes a new procedure of mounting flanged connections with washers made of shape memory alloy. A computational model was developed to allow testing the proposed method, together with a mathematical model that reproduces the behavior of shape memory alloys. The influence of the washer's geometry and heating temperature in the values of the screws' stresses was analyzed. A stud stress distribution analysis was also carried out and it was compared to the results obtained with the traditional tightening procedure.

Keywords: Flanged Connections; Shape Memory Alloys; Computational Model.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	2
2 CONEXÕES FLANGEADAS	4
2.1 APLICAÇÕES PRINCIPAIS	4
2.2 TIPOS DE FLANGES	5
2.2.1 Flange Integral	5
2.2.2 Flange de Pescoço	5
2.2.3 Flange Sobreposto	6
2.2.4 Flange Rosqueado	7
2.2.5 Flange de Encaixe	7
2.2.6 Flange Solto	8
2.2.7 Flange Cego	9
2.3 FACEAMENTO DOS FLANGES	9
2.3.1 Face com Ressalto	9
2.3.2 Face Plana	10
2.3.3 Face Para Junta de Anel	11
2.3.4 Face de Macho e Fêmea	11
2.4 JUNTAS PARA FLANGES	12
2.4.1 Juntas Não Metálicas	12
2.4.2 Juntas Metálicas Folheadas	13
2.4.3 Juntas Metálicas Maciças	13
2.4.4 Juntas Metálicas de Anel	14
2.5 PARAFUSOS DE MÁQUINA E ESTOJOS PARA FLANGES	14
2.5.1 Parafusos de Máquina	14
2.5.2 Estojos	15
2.5.3 Aperto em Parafusos de Máquina e Estojos	15
3 LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA	17
3.1 HISTÓRIA	17
3.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	18
3.3 PSEUDOELASTICIDADE	21
3.4 EFEITO DE MEMÓRIA DE FORMA	22

3.5	MEMÓRIA DE FORMA REVERSÍVEL	24
3.5.1	Treinamento por Deformação na Fase Martensítica.....	25
3.5.2	Treinamento por Carregamento Cíclico	26
3.5.3	Limitações do Uso de Memória de Forma Irreversível	26
3.6	APLICAÇÕES	27
4	METODOLOGIA.....	32
4.1	DESCRIÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO DA LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA	32
4.2	DESCRIÇÃO DO MODELO NUMÉRICO	35
4.2.1	Geometria	35
4.2.2	Material.....	39
4.2.3	Malha	40
4.2.4	Superfícies de Contato	43
4.2.5	Carregamento e Condições de Contorno.....	45
5	RESULTADOS.....	47
5.1	VERIFICAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO DAS LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA.....	47
5.2	PRÉ-CARREGAMENTO DAS ARRUELAS	49
5.3	DETERMINAÇÃO DA ESPESSURA DAS ARRUELAS.....	51
5.4	DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA DE TRABALHO.....	57
5.5	COMPARAÇÃO COM O MÉTODO TRADICIONAL	62
6	CONCLUSÕES.....	64
6.1	TRABALHOS FUTUROS	65
7	BIBLIOGRAFIA	66

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – DESENHO REPRESENTATIVO DE UMA CONEXÃO FLANGEADA. (SENAI, 1997).....	4
FIGURA 2 – A) DESENHO REPRESENTATIVO DE UM FLANGE INTEGRAL (SENAI, 1997) B) FLANGE INTEGRAL (AHAD TUBELINE CO., 2012).....	5
FIGURA 3 - A) DESENHO REPRESENTATIVO DE UM FLANGE DE PESCOÇO (SENAI, 1997) B) FLANGES DE PESCOÇO (AHAD TUBELINE CO., 2012)	6
FIGURA 4 – A) DESENHO REPRESENTATIVO DE UM FLANGE SOBREPOSTO (SENAI, 1997). B) FLANGE SOBREPOSTO (AHAD TUBELINE CO., 2012)	7
FIGURA 5 - A) DESENHO REPRESENTATIVO DE UM FLANGE ROSQUEADO (SENAI, 1997). B) FLANGE ROSQUEADO (AHAD TUBELINE CO., 2012).....	7
FIGURA 6 - A) DESENHO REPRESENTATIVO DE UM FLANGE DE ENCAIXE (SENAI, 1997). B) FLANGE DE ENCAIXE (AHAD TUBELINE CO., 2012)	8
FIGURA 7 - A) DESENHO REPRESENTATIVO DE UM FLANGE SOLTO (SENAI, 1997). B) FLANGE SOLTO (AHAD TUBELINE CO., 2012).....	8
FIGURA 8 - A) DESENHO REPRESENTATIVO DE UM FLANGE CEGO (SENAI, 1997). B) FLANGE CEGO (AHAD TUBELINE CO., 2012).....	9
FIGURA 9 – DESENHO REPRESENTATIVO DE UM FLANGE COM RESSALTO. (SENAI, 1997)	10
FIGURA 10 – DESENHO REPRESENTATIVO DE UM FLANGE DE FACE PLANA. (SENAI, 1997)	11
FIGURA 11 – DESENHO REPRESENTATIVO DE UM FLANGE DE FACE PARA JUNTA DE ANEL. (SENAI, 1997)	11
FIGURA 12 – DESENHO REPRESENTATIVO DE UM FLANGE DE FACE DE MACHO E FÊMEA. (SENAI, 1997)	12
FIGURA 13 – DESENHO REPRESENTATIVO DE UM PARAFUSO DE MÁQUINA. (SENAI, 1997).....	15
FIGURA 14– DESENHO REPRESENTATIVO DE UM ESTOJO. (SENAI, 1997)	15
FIGURA 15 – ESTRUTURAS CRISTALINAS DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA (EDITADO DE SCLYO, 2010)	19
FIGURA 16 – TEMPERATURAS DE TRANSFORMAÇÃO DE FASE	19
FIGURA 17 – EFEITO DE PSEUDOELASTICIDADE.....	21
FIGURA 18 – FASES PRESENTES NA LIGA DURANTE O EFEITO DE PSEUDOELASTICIDADE	22
FIGURA 19 – GRÁFICO DE TENSÃO, DEFORMAÇÃO E TEMPERATURA DE UMA LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA.....	24
FIGURA 20 – EFEITO DE MEMÓRIA DE FORMA REVERSÍVEL. (MONTEIRO JR., 2007)	25
FIGURA 21 – FIO DE APARELHO ORTODÔNTICO (BIOMEDICAL APPLICATIONS OF SHAPE MEMORY ALLOYS, PETRINI ET. AL.).....	27
FIGURA 22 - LUVAS PARA FISIOTERAPIA A) POSIÇÃO À BAIXA TEMPERATURA B) POSIÇÃO À ALTA TEMPERATURA	28
FIGURA 23 – FILTRO DE SIMON.....	28
FIGURA 24 – STENTS CONFECCIONADOS COM SMA	29
FIGURA 25 – TIPOS BÁSICOS DE ATUADORES COM EFEITO DE MEMÓRIA DE FORMA “ONE-WAY”. A) ATUADOR DE UM SENTIDO. B) ATUADOR TIPO BIASED C) ATUADOR DE DOIS SENTIDOS (HUANG, 1998)	30

FIGURA 26 – DIAGRAMA DE ENERGIA/PESO VS. PESO DE DIFERENTES ATUADORES (HIROSE ET AL. 1989)	31
FIGURA 27 – ILUSTRAÇÕES DE : A)ESTOJO B) PORCA	35
FIGURA 28 – ILUSTRAÇÕES DE A) FLANGE VISTO POR CIMA (ENCAIXE DO ANEL DE VEDAÇÃO) B) FLANGE VISTO POR BAIXO	36
FIGURA 29 – ILUSTRAÇÃO DA ARRUELA DESENVOLVIDA PARA SIMULAÇÃO (50MM)	37
FIGURA 30 – ILUSTRAÇÃO DO ANEL DE VEDAÇÃO	37
FIGURA 31 – A) MONTAGEM DO FLANGE B) MONTAGEM DO FLANGE EM CORTE (VISUALIZAÇÃO DO ANEL DE VEDAÇÃO)	38
FIGURA 32 – GRÁFICO DE TENSÃO VERDADEIRA VS. DEFORMAÇÃO DO AÇO EMPREGADO NO ANEL DE VEDAÇÃO	39
FIGURA 33 – GRÁFICO TENSÃO VS. DEFORMAÇÃO VS. TEMPERATURA DA LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA UTILIZADA NA SIMULAÇÃO NUMÉRICA	40
FIGURA 34 – DESENHOS COMPARATIVOS DOS ELEMENTOS C3D8 (DIREITA) E C3D8R (ESQUERDA). (WEB.MIT.EDU, 2012)	41
FIGURA 35 – MALHA DE ELEMENTOS FINITOS DE A) PORCA E B) ESTOJO	42
FIGURA 36 – MALHA DE ELEMENTOS FINITOS DO FLANGE	42
FIGURA 37 – MALHA DE ELEMENTOS FINITOS DO ANEL DE VEDAÇÃO	43
FIGURA 38 – MALHA DE ELEMENTOS FINITOS DAS ARRUELAS DE LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA	43
FIGURA 39 – A) PROPRIEDADE PADRÃO DE CONTATO B) PROPRIEDADE DE CONTATO EMPREGADA NA SIMULAÇÃO (ABAQUS ANALYSIS USER’S MANUAL)	44
FIGURA 40 – PRÉ-CARREGAMENTO DAS ARRUELAS. AS SETAS ROXAS INDICAM O SENTIDO DE APLICAÇÃO DE PRESSÃO	45
FIGURA 41 – GRÁFICO COMPARATIVO DE TENSÃO VS. DEFORMAÇÃO, A 373K	48
FIGURA 42 – GRÁFICO DE TENSÃO VS. DEFORMAÇÃO DURANTE A APLICAÇÃO E REMOÇÃO DA CARGA	50
FIGURA 43 – FASES M E M- VS. TENSÃO NAS ARRUELAS, DURANTE A APLICAÇÃO E REMOÇÃO DA CARGA	50
FIGURA 44 – TENSÃO DE VON MISES NA CONEXÃO FLANGEADA COM ARRUELA DE 30MM	52
FIGURA 45 - TENSÃO DE VON MISES NA CONEXÃO FLANGEADA COM ARRUELA DE 40MM	52
FIGURA 46 - TENSÃO DE VON MISES NA CONEXÃO FLANGEADA COM ARRUELA DE 50MM	53
FIGURA 47 – TENSÃO DE VON MISES NA CONEXÃO FLANGEADA COM ARRUELA DE 60MM	53
FIGURA 48 – TENSÃO DE VON MISES NA CONEXÃO FLANGEADA COM ARRUELA DE 70MM	54
FIGURA 49 – TENSÃO DE VON MISES NA CONEXÃO FLANGEADA COM ARRUELA DE 80MM	54
FIGURA 50 – TENSÃO DE VON MISES NA CONEXÃO FLANGEADA COM ARRUELA DE 85MM	55
FIGURA 51 – GRÁFICO DE TENSÃO NOS ESTOJOS VS. ESPESSURA DAS ARRUELAS	55
FIGURA 52 – ILUSTRAÇÕES EM CORTE DO ANEL NO FLANGE A) ANTES DA DEFORMAÇÃO B) APÓS A DEFORMAÇÃO	56
FIGURA 53 – GRÁFICO DAS FASES NAS ARRUELAS VS. TEMPERATURA DURANTE O AQUECIMENTO	58
FIGURA 54 – DEFORMAÇÃO NA ARRUELA VS. PORCENTAGEM DE AUSTENITA NA LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA	58
FIGURA 55 – GRÁFICO DE TENSÃO VS. TEMPERATURA PARA DIFERENTES CARREGAMENTOS SIMULADOS	59

FIGURA 56 – FRAÇÃO DE AUSTENITA VS. TEMPERATURA PARA DIFERENTES CARREGAMENTOS SIMULADOS	60
FIGURA 57 – TEMPERATURA DE TRANSFORMAÇÃO COMPLETA VS. TENSÃO NOS FIOS.....	60
FIGURA 58 – GRÁFICO DE TENSÃO DE VON MISES NOS ESTOJOS VS. TEMPERATURA	61
FIGURA 59 – SEQUÊNCIAS DE APERTO DOS ESTOJOS: A) ADJACENTE B) CRUZADO.....	62

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – PARÂMETROS DO MOLDELO MATEMÁTICO DAS LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA	47
TABELA 2 – DEFORMAÇÕES NAS ARRUELAS DE ACORDO COM A ESPESSURA	51
TABELA 3 – COMPARAÇÃO DAS CARGAS NOS ESTOJOS	63

1. Introdução

Nos últimos anos o Brasil se deparou com um rápido crescimento de sua produção de petróleo impulsionado pelo aquecimento da economia interna e alta dos preços internacionais da commodity. Além disso, verifica-se que a produção nacional, preponderantemente offshore, caminha, cada vez mais, para ambientes de águas profundas e ultra-profundas. Esses fatos geram a necessidade da implementação de práticas mais seguras na exploração, produção e transporte de hidrocarbonetos de modo que acidentes, como vazamentos de óleo, sejam evitados.

Partindo-se deste princípio, a manutenção da integridade física das estruturas de escoamento de petróleo e seus derivados deve ser um dos focos de estudo acadêmico da engenharia de petróleo em prol do aperfeiçoamento das atividades da indústria. No Brasil, encontra-se em exercício a aplicação de dutos flexíveis, conectados por meio de flanges, em diversas atividades ligadas ao transporte offshore de hidrocarbonetos. Como exemplo, nos campos de Barracuda e Caratinga, situados na Bacia de Campos, conexões flangeadas em dutos flexíveis aparecem em linhas de injeção de gás para Gas Lift e de produção de óleo, bem como no gasoduto que interliga as unidades de produção dos dois campos.

Inserido neste contexto, o presente trabalho propõe o emprego de uma nova tecnologia na montagem de conexões flangeadas de dutos submarinos aplicados no escoamento de petróleo. Seguem, nos três próximos itens deste capítulo, definições mais detalhadas da motivação e do objetivo da tese, bem como a descrição da organização do texto.

1.1 Motivação

A presença de conexões não soldadas em tubulações – principalmente aquelas em que escoam fluidos tóxicos – é considerada crítica, por se tratarem de estruturas onde a possibilidade de ocorrência de vazamento é, relativamente, elevada. Entre estas conexões encontram-se, por exemplo, as rosqueadas e as flangeadas. Portanto, assegurar a integridade física desses elementos, quando aplicados na indústria do petróleo, é de vital importância para que sejam evitados vazamentos de hidrocarbonetos, e consequentemente, perdas financeiras e catástrofes ambientais.

A montagem de uma conexão do tipo flangeada tem como procedimento tradicional a aplicação de torque sequencial ou cruzado nos diversos estojos que conferem a união entre flanges. A carga necessária e a sequência de aperto que garantem a vedação metálica são objetos de interesse e estudo de diversos grupos de pesquisa.. Além de moroso, esse procedimento gera um desbalanceamento na distribuição de cargas entre estojos, o que fragiliza a conexão e pode levar a sua falha. Outro ponto importante é o excesso de torque nos parafusos que pode gerar cisalhamento e consequente falha dos mesmos. Adicionalmente, esse método é de difícil execução em conectores já instalados, no eventual caso de necessidade de substituição de um ou mais estojos.

Para que seja preservado o uso desse tipo de conexão, portanto, se faz necessário desenvolver um novo método de montagem a fim de se aumentar a confiabilidade da estrutura.

1.2 Objetivos

O objetivo do trabalho é estudar a viabilidade do uso de uma nova metodologia para aplicação de carga em estojos de conexões flangeadas através do uso de arruelas fabricadas com material com memória de forma. O método proposto visa a assegurar maior homogeneidade no aperto dos estojos da conexão.

Com este objetivo, foi reproduzido numericamente o procedimento de montagem e aplicação de carga nos flanges, através do método dos elementos finitos e rotinas especializadas para caracterizar o comportamento de ligas com memória de forma. Assim, foi possível dimensionar as arruelas, determinando se sua capacidade de tracionar os parafusos atinge o carregamento alvo destes, e comparar os resultados com o método tradicional de montagem de flanges.

1.3 Organização da Dissertação

Serão abordados nesta dissertação os seguintes tópicos:

- Capítulo 2: Revisão Bibliográfica sobre Conexões Flangeadas. Serão abordados tipos de flanges para tubos, materiais de fabricação e componentes da conexão como elemento de vedação, parafusos e estojos.

- Capítulo 3: Revisão bibliográfica sobre Ligas com Memória de Forma. Serão apresentados o resumo da história do material, propriedades e exemplos de aplicação.
- Capítulo 4: Metodologia. Serão abordados o modelo numérico empregado em software de elementos finitos, e o modelo matemático que descreve o comportamento das ligas com memória de forma.
- Capítulo 5: Resultados. Serão abordados os resultados obtidos por meio de simulação numérica, como a influência da geometria e temperatura de trabalho das arruelas e comparação do método proposto com o tradicional;
- Capítulo 6: Conclusões.

2 Conexões Flangeadas

A estrutura básica de uma conexão flangeada tem como componentes dois flanges, um jogo de parafusos, porcas e arruelas, ou estojos, e uma junta de vedação, como demonstrado na figura 1.

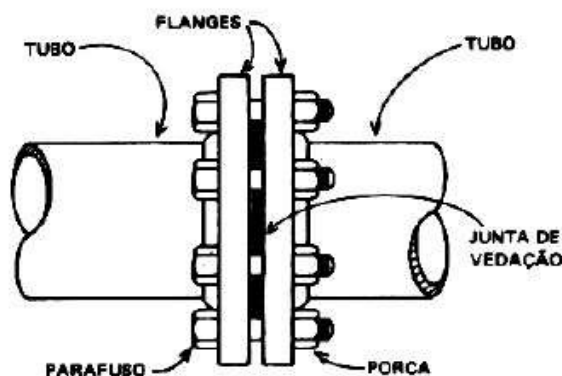


Figura 1 – Desenho Representativo de uma Conexão Flangeada. (SENAI, 1997)

Estes três tipos de elementos básicos da conexão flangeada, bem como suas aplicações, serão discutidos nas seções seguintes.

Os especificações dos flanges apresentados nesse capítulo seguem a norma norte americana ANSI.B.16.5.

2.1 Aplicações Principais

O emprego de conexões flangeadas ocorre principalmente em três casos:

- Ligação de tubos com válvulas e equipamentos, como bombas e compressores;
- Ligação em regiões específicas ao longo de tubulações que utilizam outro tipo de conexão, como solda ou rosca, em pontos em que haja a necessidade de desmontagem facilitada;
- Ligação entre tubos de aço com revestimento interno anticorrosivo. Nesse caso a proteção contra corrosão deve se estender também sobre as faces do flange, permitindo continuidade perfeita do revestimento.

Quanto às dimensões das tubulações que empregam esse tipo de conexão, a norma ANSI.B.16.5 prevê diâmetros nominais de possíveis $\frac{1}{2}$ a 24 polegadas. Em geral o uso se concentra em flanges com mais de 2 polegadas.

É importante ressaltar que, embora seja vantajoso o uso de conexões flangeadas nas situações acima descritas, seu uso é geralmente limitado ao menor número possível. Isto porque, além de serem pesadas e volumosas, essas peças, como são concebidas atualmente, são consideradas como pontos em que a possibilidade vazamentos é relativamente alta.

2.2 Tipos de Flanges

2.2.1 Flange Integral

Os flanges integrais são fundidos ou forjados com o tubo. Este é o tipo mais antigo e também mais resistente entre todos os tipos de flanges. No caso de ligação de tubos com válvulas, bombas, turbinas e outras máquinas em geral, os flanges são quase sempre integrais com os equipamentos. A figura 2 ilustra este tipo de flange:

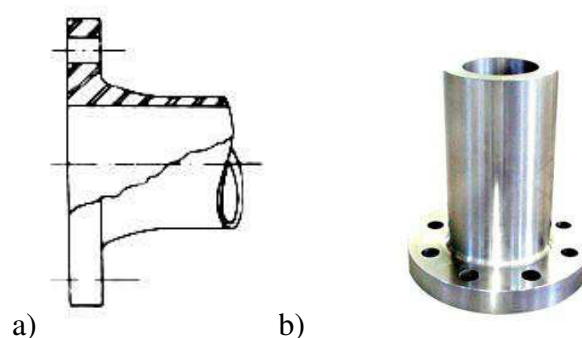


Figura 2 – a) Desenho Representativo de um Flange Integral (SENAI, 1997) b) Flange Integral (AHAD Tubeline co., 2012)

2.2.2 Flange de Pescoço

A característica principal deste tipo de flange é sua ligação com o tubo, feita a partir de uma única solda de topo. Isso deixa sua face interna perfeitamente lisa, sem a presença de descontinuidades que possam concentrar tensões ou facilitar o processo corrosivo.

Embora esse processo torne sua montagem cara, visto que os dutos devem ser cortados na medida certa – com pouca tolerância – e suas extremidades chanfradas

para a solda, esse é o tipo de flange mais usado em tubulações industriais. Sua aplicação é permitida para todos os diâmetros especificados na norma ANSI.B.16.5 e para uma vasta gama de temperaturas e pressões de operação.

Entre todos os flanges não integrais, trata-se do mais resistente, que permite melhor aperto e menores tensões residuais. A figura 3 ilustra este tipo de flange:

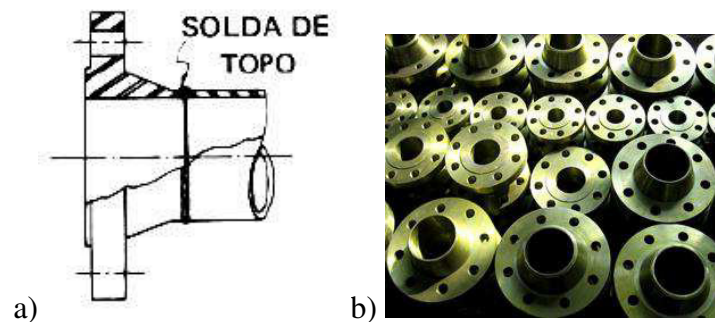


Figura 3 - a) Desenho Representativo de um Flange de Pescoço (SENAI, 1997) b) Flanges de Pescoço (AHAD Tubeline co., 2012)

2.2.3 Flange Sobreposto

Neste caso o flange é ligado ao tubo por duas soldas em ângulo, uma interna e outra externa. Sua montagem é mais fácil e barata quando comparada à do flange de pescoço pois há um encaixe entre a ponta do tubo e a estrutura do flange, o que diminui as exigências para o corte da tubulação.

Sua aplicação na indústria fica restrita a condições de processo não severas, por ter resistência mecânica inferior à do próprio tubo, se tornando um ponto sensível na tubulação. Seu aperto permissível é relativamente pequeno e seu nível de tensões residuais é elevado. Além disso, apresenta descontinuidades de seção que levam à concentração de esforços e propiciam erosão e corrosão. A figura 4 ilustra este tipo de flange:

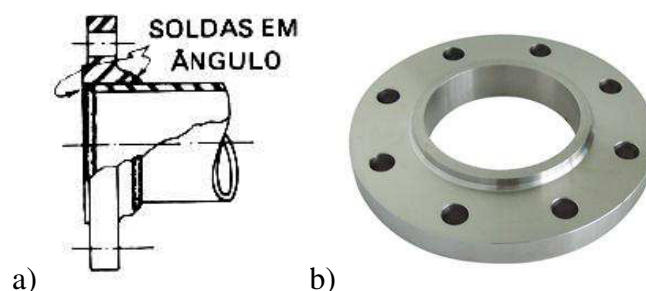


Figura 4 – a) Desenho Representativo de um Flange Sobreposto (SENAI, 1997). b) Flange Sobreposto (AHAD Tubeline co., 2012)

2.2.4 Flange Rosqueado

O flange rosqueado é caracterizado pela união com a tubulação por meio somente de uma rosca. O principal motivo do uso de rosca em flanges é a presença de metais não soldáveis em determinadas tubulações industriais, como, por exemplo, em dutos de ferro fundido, bem como a de materiais não metálicos, como plástico. Entretanto, verifica-se também o emprego desse tipo de flange em tubulações secundárias (água, ar comprimido) de aço e de ferro forjado devido à não severidade desses escoamentos e à facilidade de montagem do flange.

Sua resistência é inferior à de todos os flanges previamente citados, por contar com pequeno aperto permissível, com elevadas tensões desenvolvidas e a com a própria rosca, que atua como intensificador de esforços e permanente causa de vazamento. Por isso, a norma ANSI.B.31 prevê que, em serviços com fluidos inflamáveis, tóxicos ou perigosos de maneira geral, sejam feitas soldas de vedação entre tubo e flange. A figura 5 ilustra este tipo de flange:

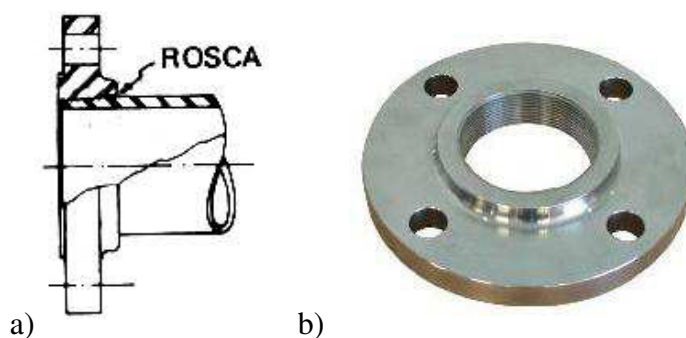


Figura 5 - a) Desenho Representativo de um Flange Rosqueado (SENAI, 1997). b) Flange Rosqueado (AHAD Tubeline co., 2012)

2.2.5 Flange de Encaixe

A conexão deste tipo de flange é semelhante à do flange sobreposto, exceto pelo encaixe completo que este apresenta para a ponta do tubo, que dispensa a necessidade de solda interna e o torna mais resistente.

Sua aplicação se concentra em tubulações de aço de pequeno diâmetro, em média até 2 polegadas, em linhas de alta pressão. Além disso, devido a descontinuidade interna, aconselha-se limitar a uso a serviços onde não há corrosão sob contato. A figura 6 ilustra este tipo de flange:

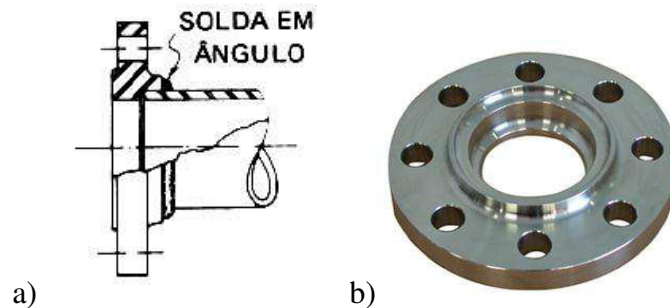


Figura 6 - a) Desenho Representativo de um Flange de Encaixe (SENAI, 1997). b) Flange de Encaixe (AHAD Tubeline co., 2012)

2.2.6 Flange Solto

Este tipo de flange, ao contrário de todos os demais, não fica preso à tubulação diretamente. Também chamados de “van Stone”, quando empregados, requerem a soldagem de topo de uma peça especial chamada virola na extremidade dos tubos. Esta peça servirá de batente para o flange, que pode deslizar sobre o duto.

A vantagem desse tipo de flange é o fato de não estarem em contato direto com o fluido que circula na tubulação. Assim, seu uso é concentrado em serviços cujo fluido requer uso de materiais especiais, como aços inoxidáveis, ou tubos com revestimento interno. Logo, pode-se fabricar o flange de forma mais barata, deixando a restrição de material apenas para o duto e a virola. A figura 7 ilustra este tipo de flange:

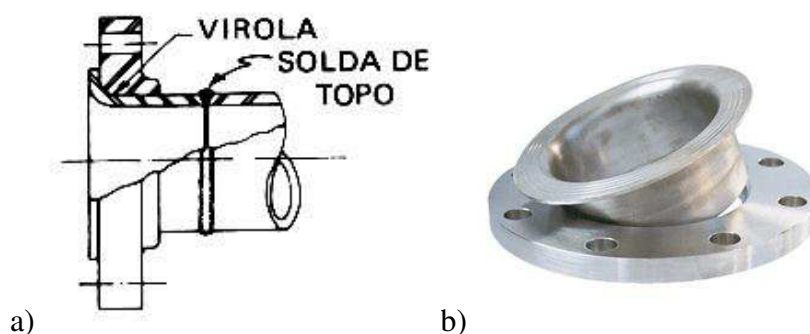


Figura 7 - a) Desenho Representativo de um Flange Solto (SENAI, 1997). b) Flange Solto (AHAD Tubeline co., 2012)

2.2.7 Flange Cego

O flange cego na verdade não constitui uma conexão flangeada e seu uso se dá na extremidade de linhas, ou no fechamento de bocais flangeados. A figura 8 ilustra este tipo de flange:

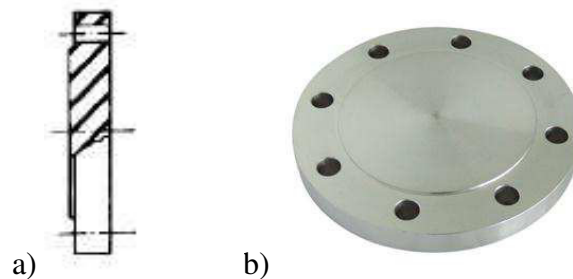


Figura 8 - a) Desenho Representativo de um Flange Cego (SENAI, 1997). b) Flange Cego (AHAD Tubeline co., 2012)

2.3 Faceamento dos Flanges

A face dos flanges é a região em que efetivamente há o contato entre as terminações de cada segmento de tubulação e que, portanto, deve assegurar a estanqueidade do sistema. Existem diversos tipos de faceamentos possíveis para conexões flangeadas, de acordo com o tipo de serviço ao qual estas se designam. A seguir encontra-se a descrição dos tipos mais comuns de faces.

2.3.1 Face com Ressalto

A face com ressalto é a mais usada em flanges de aço e pode ser aplicada a grande variedade de conjuntos de pressão e temperatura.

A altura do ressalto varia de acordo com a de pressão à qual o flange será submetido. Para classes de pressão #150 e #300, o ressalto tem 1/16 polegada enquanto que, para pressões maiores, possui 1/4 polegada. Outra diferença que os flanges desse tipo de faceamento podem apresentar entre si é quanto à superfície do ressalto, que pode ser lisa ou ranhurada. As ranhuras podem ser concêntricas ou espiraladas (também chamadas de fonográficas), sendo este último tipo mais barato e mais comum.

Há uma norma específica, (MSS-SP-6) para a confecção das superfícies dos flanges, embora não seja usada por todos os fabricantes, realizada pela “Manufacturers Standartization Society”. Segundo esta, as ranhuras devem ter profundidade de até 0,15mm e passo de 0,5mm a 1,0mm. Já os ressaltos lisos podem ter vários graus de acabamento, de acordo com o serviço ou do tipo de junta. A figura 9 ilustra este tipo de faceamento:

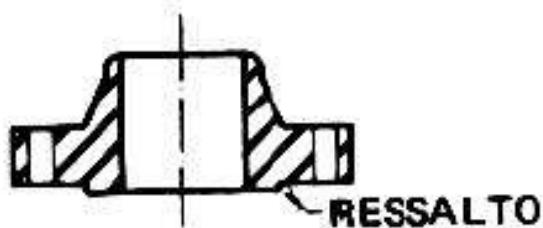


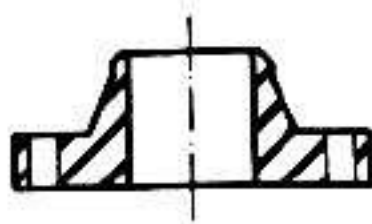
Figura 9 – Desenho Representativo de um Flange com Ressalto. (SENAI, 1997)

2.3.2 Face Plana

Este tipo de faceamento é utilizado em flanges construídos com materiais frágeis, como ferro fundido e plástico, empregados em situações de serviço não severas. Isso pois o aperto atingido com a face plana é muito inferior ao possível com a face com ressalto.

O emprego da face plana se justifica pela tendência de os materiais frágeis formarem trincas. Assim caso flanges constituídas por eles tivessem face com ressalto, o aperto dos parafusos poderia causar fraturas devido à flexão em suas bordas.

Por fim, vale citar que o uso da face plana pode ser necessário também em flanges de aço, em casos específicos. Quando se deseja efetuar a conexão da tubulação com o flange de face plana de um equipamento ou válvula fabricado com ferro fundido, deve-se também empregar a face plana no flange do duto, independente de seu material. A figura 10 ilustra este tipo de faceamento:



2.3.3 Face Para Junta de Anel

Designadas para uso em flanges de aço em serviços severos, as faces para junta de anel são amplamente empregadas na indústria do petróleo. Seu uso é requerido para tubulações cujo fluido escoante se encontra a altas temperaturas e pressões e também quando este é tóxico por apresentar mais segurança contra vazamentos.

Sua estrutura apresenta um rasco circular concêntrico com o flange, em que é encaixado um anel metálico, que atua como junta (ver Seção 2.4 – Juntas). Com isso, atinge-se uma vedação mais eficiente no flange, tanto devido à ação de cunha da junta do anel, quanto pela dilatação sofrida por este devido à pressão interna do fluido escoante, que o empurra contra as paredes do rasgo.

Para que a vedação funcione perfeitamente, é necessário que o metal de confecção do anel tenha menor dureza do que o metal das paredes do rasgo. A figura 11 ilustra este tipo de faceamento:



Figura 11 – Desenho Representativo de um Flange de Face Para Junta de Anel. (SENAI, 1997)

2.3.4 Face de Macho e Fêmea

A face de macho e fêmea tem seu uso praticamente restrito a tubulações em que escoam fluidos corrosivos. A estrutura do flange que a utiliza se fecha de uma tal maneira que a junta (ver Seção 2.4 – Juntas) quase não tem contato com o fluido. Assim, evita-se o desgaste no elemento que promove a vedação e aumenta-se a segurança do serviço. A figura 12 ilustra este tipo de faceamento:

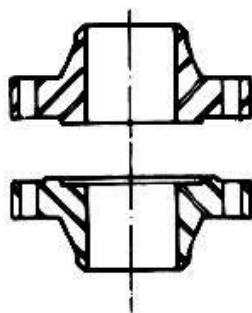


Figura 12 – Desenho Representativo de um Flange de Face de Macho e Fêmea. (SENAI, 1997)

2.4 Juntas Para Flanges

As juntas atuam na conexão flangeada como elemento de vedação. Quando em serviço, localizada entre as faces dos flanges, sua estrutura é submetida a uma compressão elevada, devido ao aperto dos parafusos e a esforços cisalhantes causados pela pressão interna do fluido circulante.

Para que a vedação proporcionada pela junta seja garantida, é necessário que a pressão proveniente dos parafusos seja superior à pressão interna da tubulação. Assim, quanto mais pressurizado for o fluido circulante, mais dura e resistente deve ser a junta, de modo que possa resistir ao carregamento combinado a que é exposta.

Por outro lado, se faz igualmente necessário que a junta apresente certa deformabilidade e elasticidade para que se molde às faces irregulares dos flanges. Assim, em serviços que exigem juntas duras – logo menos deformáveis – devido a elevadas pressões internas, é preciso maior perfeição do acabamento das faces do alinhamento dos tubos.

Segue a classificação das juntas de acordo com a forma e material de fabricação:

2.4.1 Juntas Não Metálicas

Sempre sob a forma plana, essas juntas são empregadas em flanges de face plana ou com ressalto. Podem ser fabricadas de 0,7 a 3,0mm, com diversos materiais de acordo com o uso, como demonstrado a seguir:

- a. Borracha Natural: Transporte de água, ar e condensado até 60°C;
- b. Borracha Sintética: Transporte de óleos até 80°C;

c. Materiais Plásticos: Transporte de fluidos corrosivos em baixas pressões e temperatura moderada;

d. Papelão Hidráulico (amianto comprimido com material aglutinante): De acordo com a ABNT:

i. EB-216: Amianto com composto especial de borracha: água, ar, vapor saturado e soluções neutras até 200°C;

ii. EB-212: Amianto com composto especial de borracha: vapor, amônia, cáusticos, ácidos fracos e salmoura até 500°C;

iii. EB-313: Amianto com composto resistente à ácidos: ácidos em geral;

iv. EB-827: Amianto com armação metálica inserida: vapor, óleos, hidrocarbonetos até 590°C.

3.4.2 Juntas Semimetálicas em Espiral

Sua composição conta com uma lamina metálica, geralmente de aço inoxidável, moldada na forma de uma espiral. Entre cada volta há um preenchimento com amianto. Esta estrutura torna a junta notável devido à sua elasticidade.

Seu uso se dá em flanges de face com ressalto, preferencialmente se esta apresentar acabamento liso.

2.4.2 Juntas Metálicas Folheadas

São juntas compostas por um centro de amianto e cobertura de metal, em geral aço carbono ou inoxidável, cuja espessura varia entre 2 e 3mm. Tem emprego similar ao das juntas semimetálicas em espiral, excetuando-se o fato de possuir vedação relativamente mais difícil. Assim, o acabamento das faces dos flanges pode ser liso, com rugosidade máxima de 0,002mm, ou com ranhuras concêntricas.

2.4.3 Juntas Metálicas Maciças

Empregadas em flanges de face com ressalto ou macho e fêmea, as juntas maciças metálicas são prescritas para serviços com pressões bastante altas. Estas juntas podem suas faces lisas ou ranhuradas e são fabricadas, em geral, em aço

carbono e aço inox – lembrando-se que a dureza destes deve ser inferior à das faces do flange.

2.4.4 Juntas Metálicas de Anel

São juntas em formato de anel cuja seção transversal é usualmente oval, ou octogonal. Essas peças são fabricadas com uma grande gama de metais, como aço inoxidável, aço carbono, aços liga e níquel, desde que seja respeitada a imposição de ter dureza inferior à do flange. Recomenda-se que a diferença entre as durezas seja de, no mínimo, 30 Brinell.

As juntas são necessárias para que seja garantida a vedação de tubulações cujo fluido circulante se encontra a elevadas pressões. Como a superfície de contato entre flange e junta é muito pequena, menor aperto nos parafusos é requerido em relação ao de juntas maciças metálicas.

Seu uso é observado em flanges classe a partir de #600, para vapor e hidrogênio e a partir de #900 para hidrocarbonetos, além de serviços com temperatura superior a 500°C.

2.5 Parafusos de Máquina e Estojo Para Flanges

Os parafusos de máquina e estojo são os elementos que promovem a união dos flanges e sua vedação, ao apertar a junta.

2.5.1 Parafusos de Máquina

São parafusos cilíndricos cuja cabeça, sextavada ou quadrada, é integral ao corpo. Possuem uma porção rosqueada, onde ficará a porca após sua montagem, que não abrange todo o corpo do parafuso. Suas dimensões são estabelecidas pela norma ANSI.B.18.2 e ANSI.B.1.1, que padronizam o parafuso e o filete de rosca, respectivamente. Os parafusos de máquina são designados pelo comprimento, que desconsidera a extensão da cabeça, e pelo diâmetro nominal da rosca.

A norma ANSI.B.21 prescreve o uso de parafusos de máquina em serviços não severos, em flanges de classe inferior a #300, temperatura máxima de 260°C e juntas não metálicas. A figura 13 ilustra o parafuso de máquina.

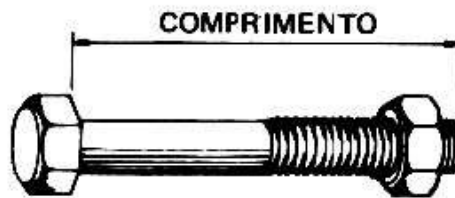


Figura 13 – Desenho Representativo de um Parafuso de Máquina. (SENAI, 1997)

2.5.2 Estojos

Ao contrário dos parafusos de máquina, os estojos não possuem cabeça integral ao corpo. Para que sejam fixados portanto, possuem duas seções rosqueadas, onde se fixam as porcas durante a montagem. Nesse caso, a parte rosqueada pode se estender por todo o comprimento.

Os estojos são empregados em flanges com classe de pressão muito superior à dos flanges de parafuso de máquina. Isso se deve ao fato de não possuírem a ligação entre cabeça e o corpo do parafuso, que se trata da região frágil dos parafusos de máquina.

Os estojos são designados pelo comprimento total e pelo diâmetro nominal da rosca.

Os materiais de confecção dos estojos estão especificados na norma ANSI.B.31.3, que os designam de acordo com as tensões admissíveis de trabalho e temperatura. A figura 14 ilustra o estajo.

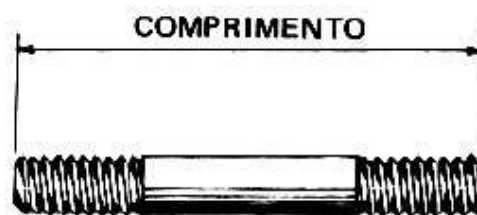


Figura 14– Desenho Representativo de um Estajo. (SENAI, 1997)

2.5.3 Aperto em Parafusos de Máquina e Estojos

O mecanismo tradicional de montagem de juntas flangeadas requer que seja aplicado um aperto nos parafusos de máquina ou estojos, de modo que a junta seja comprimida e vede a conexão. Entretanto, efeitos indesejáveis também são verificados em função deste aperto, como esforços de flexão nos flanges. Assim,

torna-se necessária a existência de normas que regulem parâmetros relacionados a este procedimento, tais qual tensão de escoamento do material dos parafusos.

Costuma-se dividir o valor do aperto aplicado em duas parcelas, cujos objetivos são distintos. A primeira, chamada aperto inicial, visa fazer com que a junta se acomode às faces do flange, levando-a ao escoamento de seu material. Logo, o valor do aperto inicial é diretamente proporcional à dureza da junta. A segunda parcela corresponde ao aperto residual, cujo objetivo é prevenir que a pressão interna da tubulação separe os flanges. Para que a vedação seja garantida, valores de aperto residual entre 1 1/2 a 2 vezes o valor da pressão interna são empregados.

Vale lembrar que, caso a conexão seja exposta em serviço a elevadas temperaturas, os parafusos e estojos podem se dilatar, diminuindo o aperto. Dessa forma, se faz necessária uma terceira fração de aperto, aplicada a quente.

3 Ligas com Memória de Forma

As ligas com memória de forma compõem uma classe de materiais inteligentes capazes de retornar a uma forma previamente definida quando submetidos a um ciclo termomecânico apropriado. Basicamente o efeito de memória de forma ocorre quando, após ser deformada em sua fase martensítica, a liga recupera sua deformação, ao ser aquecida até sua fase austenítica.

Uma grande variedade de materiais pode apresentar esse efeito, entretanto, o interesse comercial se concentra em ligas que tem grande recuperação de deformação ou que desenvolvem uma força significativamente alta durante a mudança de forma. Este é o caso particular de ligas metálicas como a Ni-Ti – utilizada no presente trabalho – e ligas de cobre, como Cu-Al-Zn e Cu-Al-Ni.

Seguem nesse capítulo seções sobre história, propriedades e aplicações das ligas com memória de forma.

3.1 História

As ligas metálicas com memória de forma foram primeiro estudadas por A. Ölander, em 1932, quando foi observado o comportamento pseudoelástico de ligas Au-Cd. Após isto, em 1938, Greninger e Mooradian, desta vez utilizando ligas Cu-Zn, estudaram a formação da fase martensítica no material.

O efeito de memória de forma de diversas ligas metálicas foi posteriormente estudado por Kurdjumov e Khandros, em 1949, que analisaram o comportamento termomecânico da martensita. A possibilidade de aplicação industrial teve seu marco em 1961, quando o pesquisador William J. Buehler, do Naval Ordnance Laboratory, observou a memória de forma em ligas equiatômicas de Ni-Ti. A relevância desta descoberta fez com que o material estudado passasse a ser conhecido como Nitinol, devido às iniciais do laboratório.

Na década de 90, Ullakko et al. realizaram um dos primeiros experimentos com ligas ferromagnéticas de memória de forma, transformando o paradigma pré-estabelecido para funcionamento destes materiais. Outra adição à classe dos materiais com memória de forma foi conseguida em 2005, quando Lendlein et al. desenvolveram os primeiros polímeros capazes de reverter deformações pseudoplásticas. Neste caso, o mecanismo de ativação se deu por luz ultravioleta.

Atualmente, diversas ligas metálicas são exploradas por seu efeito de memória de forma, sendo a mais empregada o Nitinol. Modificações a esta liga, bem como a ligas com base de cobre, foram efetuadas de modo a serem obtidas alterações em seu comportamento termomecânico. Para isto, ligas ternárias foram desenvolvidas, como NiTiPd, NiTiHf, NiTiCu, CuAlNi e CuAlMn.

3.2 Princípio de Funcionamento

As propriedades das ligas com memória de forma estão associadas às transformações ocorridas em sua estrutura cristalina. Durante estas transformações, as fases mais comuns apresentadas pelas ligas são austenita e martensita. A fase austenítica (A) possui uma única variante, com estrutura cúbica de corpo centrado, e tem como característica grande estabilidade e, por conseguinte, um elevado módulo de elasticidade. A fase martensítica (M), ao contrário, é facilmente deformada e possui estrutura cristalina dependente do tipo de transformação ocorrida. Esta pode ser monoclinica (martensita não maclada ou induzida por temperatura) ou ortorrômbica (martensita maclada ou induzida por tensão).

Este processo de transformação de fase, também é conhecido como transformação martensítica, é iniciado por mudanças na temperatura e no estado de tensões aos quais a liga é submetida. Este fato pode ser ilustrado a seguir pela figura 15.

As mudanças na estrutura cristalina das ligas com memória de forma, também conhecidas como SMAs (Shape Memory Alloys), no estado livre de tensões são marcadas pelas temperaturas em que as transformações de fase se iniciam e terminam. Durante o aquecimento, uma liga previamente martensítica começa a converter-se em austenita à temperatura A_s e termina este processo à temperatura A_f . No procedimento reverso, ao ser resfriada, a liga austenítica inicia o retorno à fase martensita à temperatura M_s e se torna 100% martensítica quando a temperatura atinge M_f . A figura 16 exemplifica o processo.

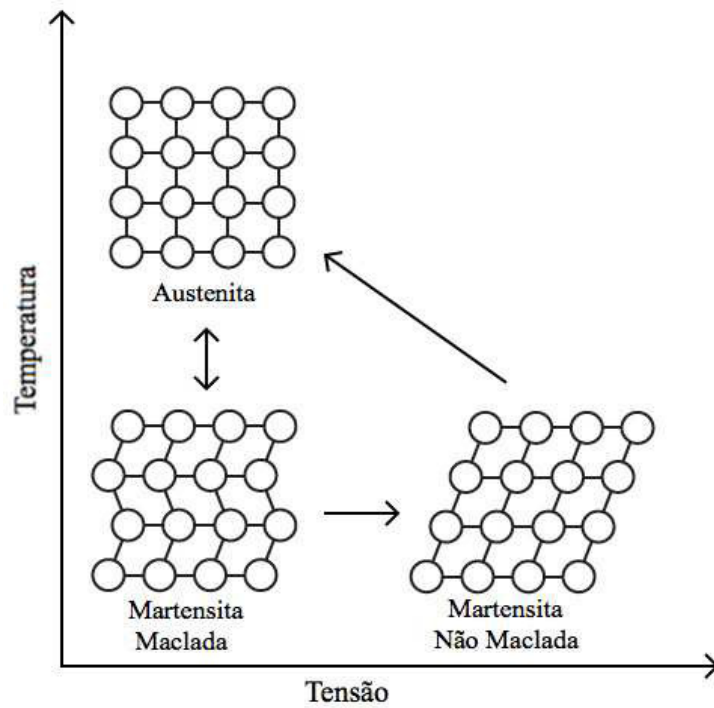


Figura 15 – Estruturas Cristalinas de Ligas com Memória de Forma (Editado de SCLYO, 2010)

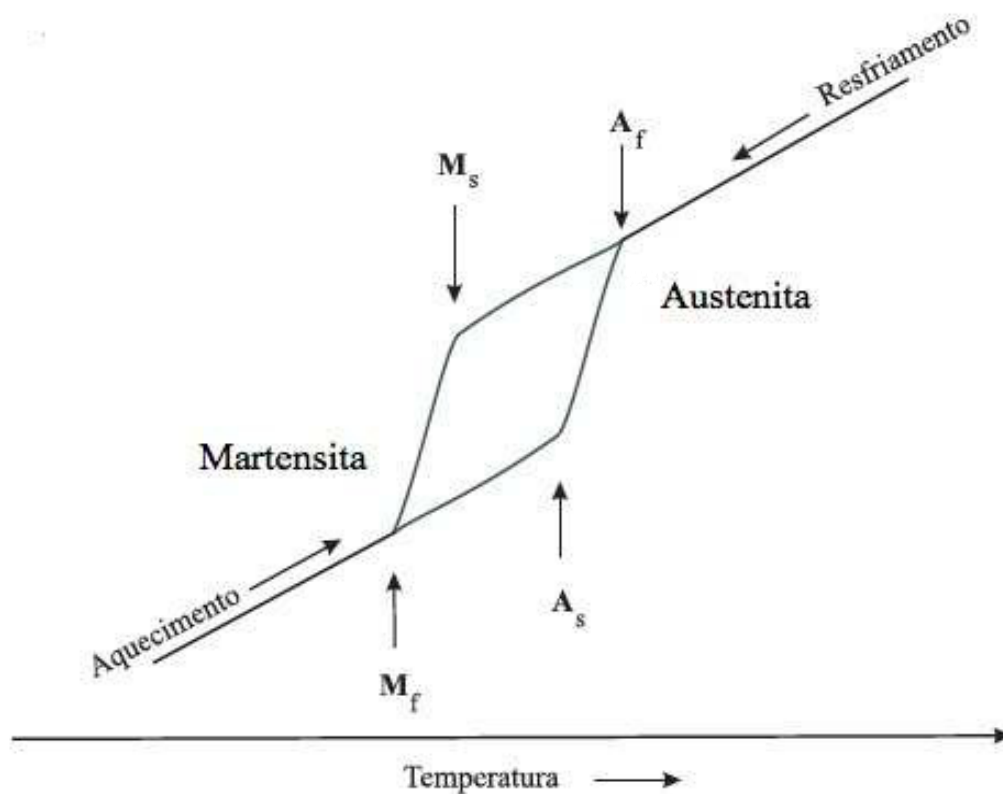


Figura 16 – Temperaturas de Transformação de Fase

Para que se possa compreender a relação entre as transformações martensíticas e o comportamento das ligas com memória de forma, é preciso analisar os fenômenos ocorridos em sua estrutura cristalina durante este processo. As transformações de fase podem ser divididas em difusivas e não difusivas. Durante as

difusivas, ocorre movimento aleatório dos átomos, por distâncias relativamente grandes, para que se forme uma nova fase. Desse modo, são transformações dependentes do tempo e temperatura. Já durante as não difusivas, os átomos são reorganizados produzindo uma estrutura mais estável, sem que ocorra migração, o que elimina a dependência temporal desta transformação. Neste caso, o movimento de um átomo do início ao fim da transformação é inferior a uma distância interatômica. A transformação martensítica se enquadra na última categoria.

Inicialmente estudadas para caracterizar as fases presentes no aço, as transformações martensíticas foram divididas em duas etapas. Na primeira acontece a deformação da rede, em que movimentos atômicos não aleatórios de pequena amplitude iniciam a formação da nova estrutura. Na segunda, ocorre a acomodação da rede, que pode se dar tanto devido a alterações em sua forma quanto em seu volume. Estas etapas ocorrem igualmente em ligas com memória de forma, com exceção da acomodação da rede que, nas SMAs, se dá unicamente por modificações na forma, e não no volume.

Durante a acomodação da rede, ainda, ocorre outro processo que diferencia as SMAs da maioria dos materiais martensíticos. Estes, em geral, apresentam o processo de acomodação por deslizamento. Ao contrário, as ligas como Ni-Ti apresentam acomodação por macla que, embora não comporte alterações no volume da rede, acomoda mudanças na sua forma de maneira reversível.

Uma característica fundamental para compreensão das propriedades das ligas com memória de forma é a simetria das estruturas austeníticas e martensíticas. A martensita possui, em geral, uma estrutura muito menos simétrica do que a austenita. Assim, existem formas distintas de uma estrutura austenítica se transformar em martensita, porém há só uma maneira de a martensita voltar a ser austenita. Como consequência, uma peça composta por liga com memória de forma, independentemente da forma que tenha adquirido sob a fase martensítica, volta à forma original durante o processo de transformação em austenita.

A partir do conhecimento das transformações ocorridas na estrutura de SMAs, podem-se explorar diferentes efeitos produzidos pela alteração do estado de tensões e de temperatura experimentados por estes materiais. Entre eles encontram-se a pseudoelasticidade e o efeito de memória de forma, tanto reversível quanto irreversível.

3.3 Pseudoelasticidade

A pseudoelasticidade é um fenômeno observável em ligas com memória de forma a temperaturas superiores a A_f . Nesta situação, caso seja aplicada uma carga, de tração ou compressão, sobre o material austenítico, este se comporta elasticamente até que uma tensão σ_c , considerada crítica, seja atingida. A partir deste ponto, a fase austenítica não é mais estável, mesmo em altas temperaturas, e se inicia o processo de conversão da estrutura em martensita. Ao se retirar a carga da estrutura, a transformação inversa ocorre, e a estrutura volta à fase austenítica. A figura 17 ilustra o processo:

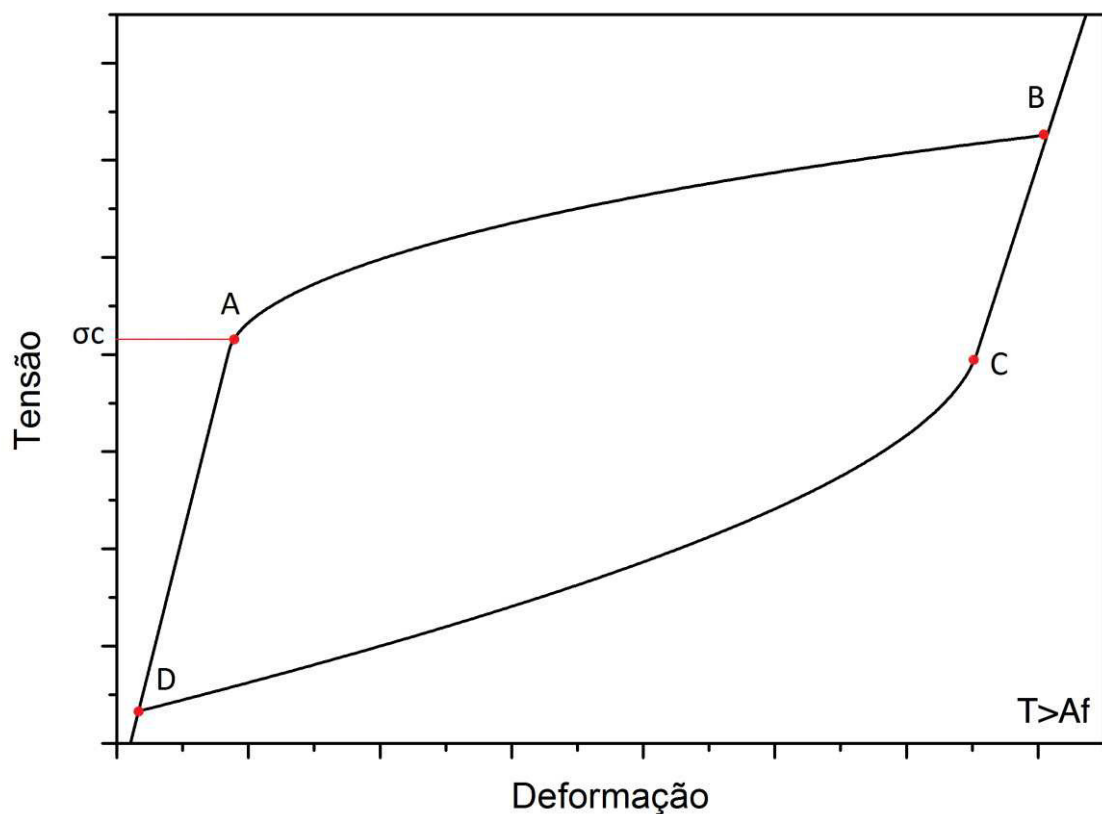


Figura 17 – Efeito de Pseudoelasticidade

No gráfico acima, o ponto A marca o início da transformação de fase de austenita para martensita. Este processo ocorre até que se atinja o ponto B, em que a estrutura do material se encontra completamente composta por martensita. Ao ser removida a tensão, devido à temperatura superior à A_f , a martensita torna-se instável e no ponto C o regresso à fase austenítica se inicia. Em D a liga cessa o processo de transformação e tem toda a deformação obtida no carregamento recuperada. O gráfico da figura 18 representa as alterações na estrutura cristalina da liga com

memória de forma durante o carregamento e descarregamento da estrutura, descrito acima.

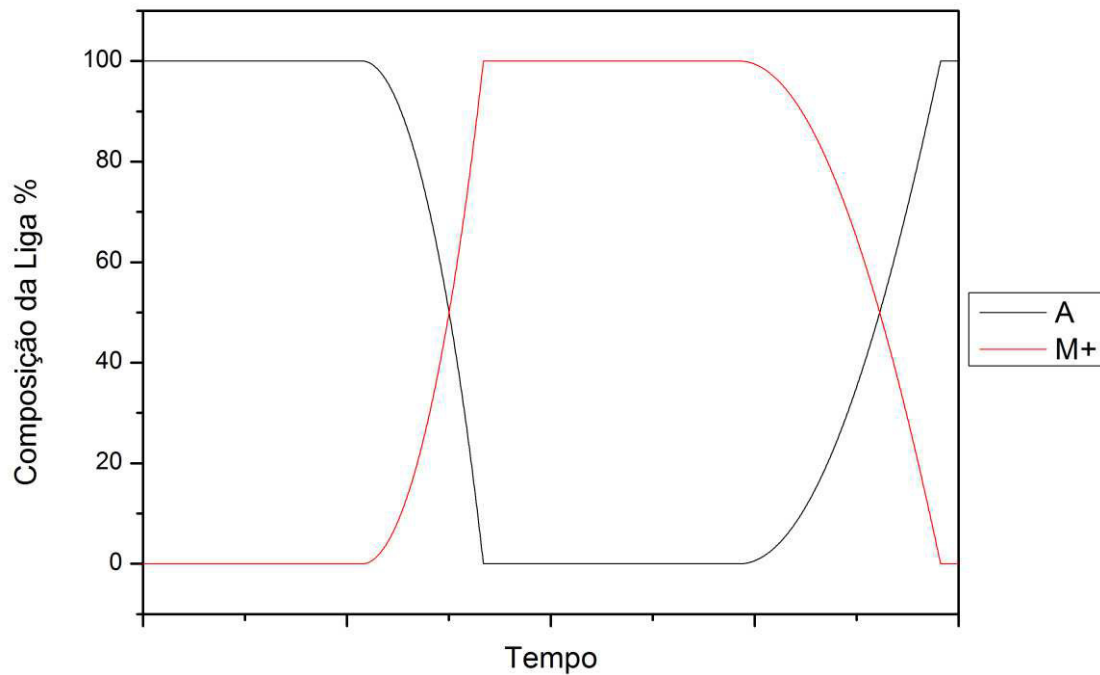


Figura 18 – Frações Volumétricas Presentes na Liga durante o Efeito de Pseudoelasticidade

É importante notar que, no caso exemplificado, toda a deformação sofrida durante a aplicação de carga é revertida após a transformação inversa em austenita e remoção da tensão. Entretanto, existe um limite de deformação recuperável e, a partir dele, o material se comporta plasticamente e não há retorno à forma original.

Caso o material originalmente não se encontrasse a $T > A_f$, mas a uma temperatura intermediária entre A_s e A_f , o fenômeno observado seria chamado de pseudoelasticidade parcial. Isto pois, a estas temperaturas, o material não se encontra 100% austenítico, contendo, em sua estrutura, frações de martensita. Dessa forma, após ser carregado e descarregado, por não voltar a uma estrutura totalmente composta por austenita, não há recuperação total da deformação sofrida no carregamento.

3.4 Efeito de Memória de Forma

O efeito de memória de forma é observável quando, após ser deformado, o material retorna à forma original ao ser submetido a uma temperatura acima de A_f . As etapas deste fenômeno, também conhecido como efeito de memória de forma one-way são descritas a seguir:

Uma amostra de SMA a temperatura inferior à M_f , portanto, com estrutura martensítica (M), é submetida a um carregamento, seja trativo ou compressivo. Em um primeiro momento, obtém-se uma resposta elástica à carga, que dura até que a tensão atinja um valor crítico. A partir deste ponto ocorre uma reorientação da estrutura martensítica e esta adquire a forma da variante M+ (tração) ou M- (compressão). Durante esta reorientação o material experimenta grandes deformações. Uma vez completamente transformado em M+ ou M-, o material reassume um caráter elástico, sofrendo deformação linearmente proporcional à tensão. Caso seja descarregada, a liga com memória de forma recupera apenas a deformação adquirida no regime linear, e permanece com a estrutura M+ ou M-, com grande deformação residual em sua estrutura. Para que esta deformação seja revertida e a estrutura volte à forma original, é preciso que esta seja aquecida a uma temperatura superior à A_f , em que sua estrutura é totalmente austenítica. Daí em diante, pode ocorrer o resfriamento da liga a valores de temperatura inferiores à M_f , que, embora sua estrutura volte a ser martensítica, a forma permanece intacta.

No gráfico da figura 19, representativo do efeito de memória, o trajeto de O a A corresponde à resposta elástica do material. De A até B, ocorre a transformação de M para M+. Já de B até C, é observada a resposta elástica da estrutura M+. O descarregamento se inicia em C, e de C até D a carga é revertida completamente e se dá o início do aquecimento, sem que haja conversão da estrutura em austenita. O processo de recuperação da forma é iniciado em D, quando a fase austenítica começa a surgir na estrutura, devido ao aquecimento. Este processo se encerra em E e, de E a O, há o retorno à fase martensítica maclada, decorrente da diminuição da temperatura.

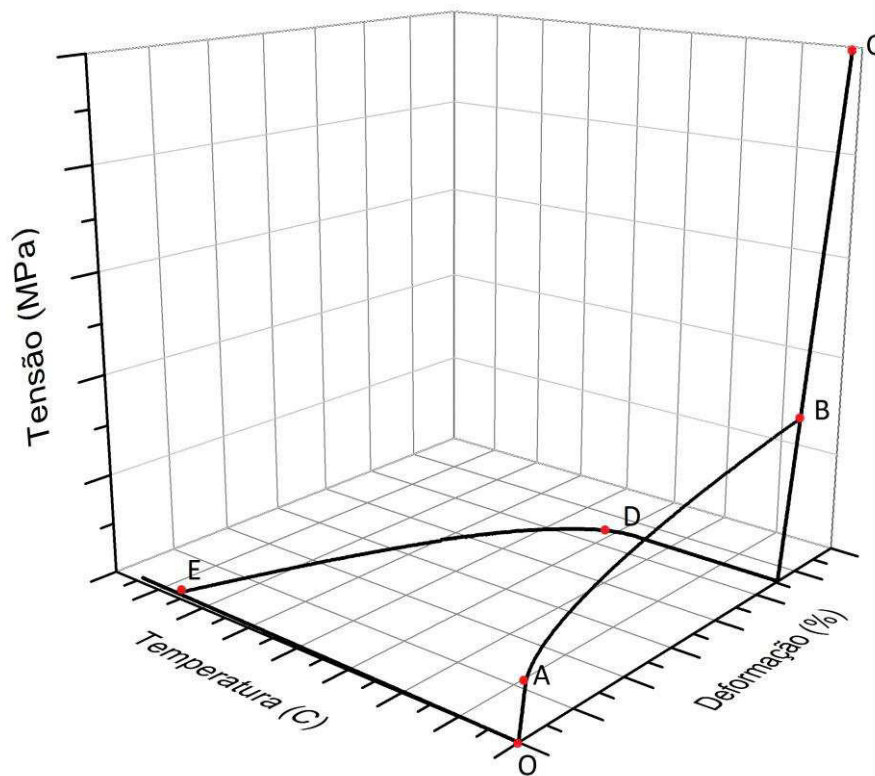


Figura 19 – Gráfico de Tensão, Deformação e Temperatura de uma Liga com Memória de Forma

É importante ressaltar que a temperatura necessária para que a forma seja recuperada é dependente do nível de tensões ao qual a estrutura é submetida. No gráfico está exemplificado o caso em que o aquecimento ocorre na estrutura livre de tensões, à uma temperatura A_f . Entretanto, na maior parte das ligas, mesmo que não estivesse em um estado livre de tensões, a estrutura poderia voltar a forma original caso fosse aquecida a uma temperatura suficientemente alta, superior àquela A_f para o caso livre de tensões.

Deformações recuperáveis em ligas NI-Ti com este efeito da ordem de 8% a 11% são viáveis. Entretanto, deve-se atentar ao valor de tensão imposto às ligas com memória de forma pois, a partir de um determinado limite, podem ser causados danos permanentes ao material. Este limite de tensão é inferior à tensão verdadeira de escoamento. Aquecimento excessivo também pode ser responsável por degradação das propriedades destes materiais.

3.5 Memória de Forma Reversível

A memória de forma reversível envolve a mudança de forma do material devido a alterações apenas na temperatura. Para isto, ao contrário do efeito de

memória de forma convencional, este fenômeno proporciona memorização da forma da estrutura tanto em baixas quanto em altas temperaturas.

No efeito de memória de forma “one-way”, a liga adquire uma forma específica quando aquecida e convertida em austenita. Entretanto, ao ser resfriada, esta se torna martensítica e tem sua forma inalterada, a não ser que seja carregada mecanicamente. Já no caso reversível, o resfriamento também faz com que o material assuma um formato próprio.

Para que este efeito seja obtido é preciso que a liga seja submetida a um treinamento, através de ciclos termomecânicos. A figura 20 exemplifica este tipo de procedimento:

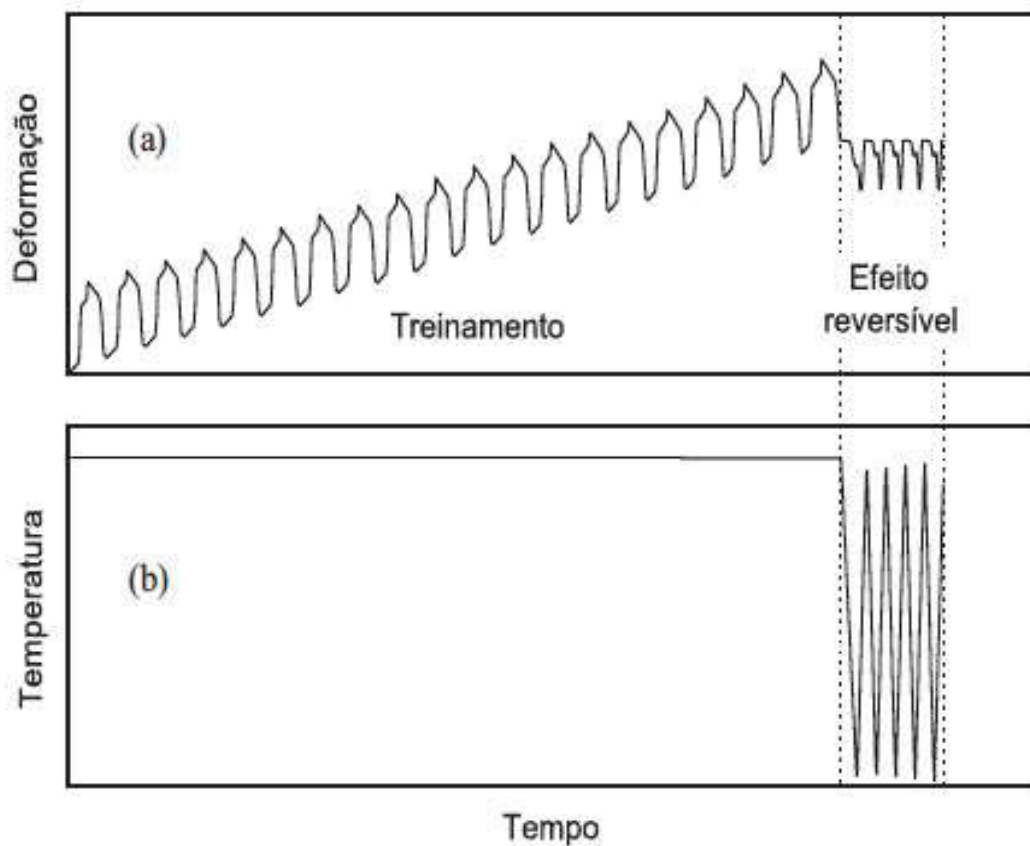


Figura 20 – Efeito de Memória de Forma Reversível. (Monteiro Jr., 2007)

Segue a descrição de dois dos diversos tipos de treinamento existentes.

3.5.1 Treinamento por Deformação na Fase Martensítica

Este tipo de treinamento prevê que, a temperaturas inferiores à M_f , imponha-se uma deformação à liga que exceda o limite de recuperação possível com

aquecimento. Ou seja, a liga, quando convertida em austenita, não apresenta recuperação completa da forma original.

Embora isto implique perda de parte do efeito de memória de forma, faz com que, uma vez resfriada a temperaturas abaixo de M_f , espontaneamente haja reversão do processo de deformação excessiva na liga. Logo, há uma forma similar à original associada à fase austenítica e outra forma, deformada, associada à martensita.

3.5.2 Treinamento por Carregamento Cíclico

No treinamento por carregamento cíclico impõem-se à liga ciclos repetidos do efeito de memória de forma one-way. Estes ciclos incluem: resfriamento da liga a temperaturas inferiores à M_f , carregamento mecânico de forma a obter deformação abaixo do limite máximo recuperável e aquecimento suficiente para converter todo o material em austenita.

A repetição desta sequência, em geral de 10 a 15 vezes, faz com que o material, de forma espontânea, passe a “memorizar” a forma deformada quando se encontra a baixas temperaturas. Logo, uma vez submetida ao treinamento, basta resfriar a liga para obtenção da forma diferente daquela apresentada pela austenita. As deformações recuperáveis naturalmente com este método são cerca de 4 a 5 vezes menores do que a deformação imposta no treinamento.

3.5.3 Limitações do Uso de Memória de Forma Irreversível

O treinamento das ligas com memória de forma pode levar a efeitos indesejáveis. Entre estes encontram-se a elevação da temperatura de transformação de fase, aumento do ciclo de histerese e aumento dos níveis de deformação permanente.

Outro limitante é o valor máximo de deformação recuperável obtido com os treinamentos, cerca de 2%, o que é muito inferior ao limite do efeito de memória de forma irreversível. Além disso, a assimetria das forças produzidas durante a mudança de forma quando se comparam o aquecimento e o resfriamento diminui a aplicabilidade deste efeito. É comum que as forças produzidas durante o aquecimento sejam muito superiores às do resfriamento. Por fim, em ligas com memória de forma irreversível há um limite máximo de aquecimento, que depende

de fatores como composição e tratamento térmico do material. Caso ultrapassado, pode-se observar na liga diminuição ou mesmo perda do efeito reversível.

3.6 Aplicações

Ligas com memória de forma apresentam um vasto campo de aplicações, desde a engenharia à área biomédica. Nestes casos, são explorados os efeitos de memória de forma, reversível ou não, bem como a pseudoelasticidade, propriedades que conferem às ligas grande potencial de utilização. Seguem alguns exemplos do emprego de ligas com memória de forma.

Na área biomédica, a excelente biocompatibilidade de ligas como NiTi evita que estas, quando em interação com o organismo humano, cause rejeição. A seguir são apresentadas algumas aplicações das ligas com memória de forma nesta área, extraídos de Petrini e Migliavacca [9]:

- **Aparelhos Ortodônticos:** A primeira aplicação de ligas com memória de forma, datando de 1975, são os fios de aparelhos ortodônticos que exploram a pseudoelasticidade do material. Durante a instalação, estes fios são deformados de modo que haja uma transformação de fase de austenita para martensita. Uma vez posicionados, os fios entram em contato com a temperatura bucal, e tendem a retornar à fase austenítica e, portanto, retornar à forma original. Assim, como o recomposição da forma original é restrita pela arcada dental, uma força constante e suave é aplicada de forma a alinhar os dentes do paciente. A figura 21 de exemplo destes fios, na forma original:

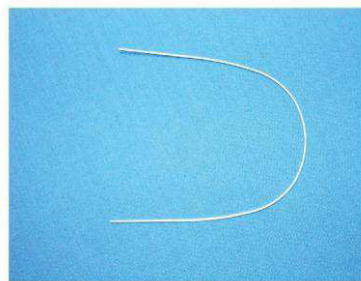


Figura 21 – Fio de Aparelho Ortodôntico (Biomedical Applications of Shape Memory Alloys, Petrini et. al.)

- **Equipamentos de Fisioterapia:** Durante a fisioterapia em casos de atrofia muscular parcial, equipamentos que mimetizam o movimento

humano a partir da memorização de uma forma não deformada a quente e uma deformada a frio. Logo, explora-se, neste caso, o efeito de memória reversível. Um exemplo deste tipo de aplicação são luvas, como a ilustrada na figura 8 abaixo:

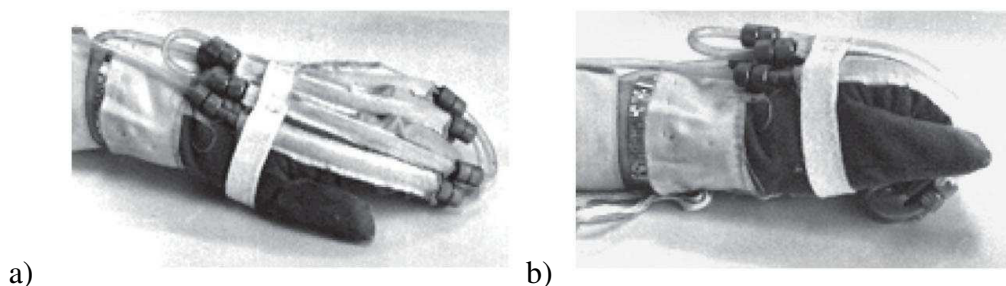


Figura 22 - Luvas para Fisioterapia a) Posição à baixa temperatura b) Posição à alta temperatura

- **Aplicações Vasculares:** No ramo vascular as ligas com memória de forma permitiram o desenvolvimento de técnicas pouco invasivas, em que a patologia é tratada por inserção percutânea de dispositivos, em vez de por intervenção cirúrgica. A primeira aplicação neste campo se deu com o uso de Filtros de Simon, usados para prevenir embolia em pacientes incapazes de tolerar anticoagulantes. À temperatura ambiente, estes dispositivos que servem para reter coágulos encontram-se na fase martensítica e, uma vez à temperatura corporal humana, convertem-se em austenita. Assim, este é deformado para inserção e, uma vez posicionado nas veias, recupera sua forma original, mostrada na figura 23:

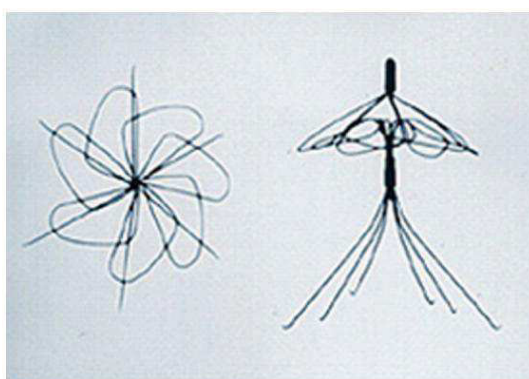


Figura 23 – Filtro de Simon

Outro caso de uso bem sucedido destas estruturas é o de stents auto-expansíveis. Com uso similar ao do Filtro de Simon, esta estrutura cuja função é manter vasos sanguíneos (obstruídos por arteriosclerose) abertos, é deformada para inserção e, uma vez em

contato com a temperatura do organismo, expande-se e sustenta as paredes dos vasos. Observam-se estas estruturas na figura 24:



Figura 24 – Stents confeccionados com SMA

Já na área de engenharia, um uso notável de ligas com memória de forma se dá em atuadores. Huan, em 1998 [9] apresenta diversos exemplos de atuadores cujos princípios básicos de funcionamento serão discutidos a seguir.

Para aplicação em atuadores, tanto o efeito de memória de forma one-way quando o reversível são empregados. Entretanto, embora o segundo tenha a vantagem de proporcionar movimentos em dois sentidos, suas deformações recuperáveis são muito inferiores aos do efeito de memória de forma one-way, o que torna seu uso desinteressante. Algumas soluções para uso do efeito one-way são possíveis, como indica a figura:

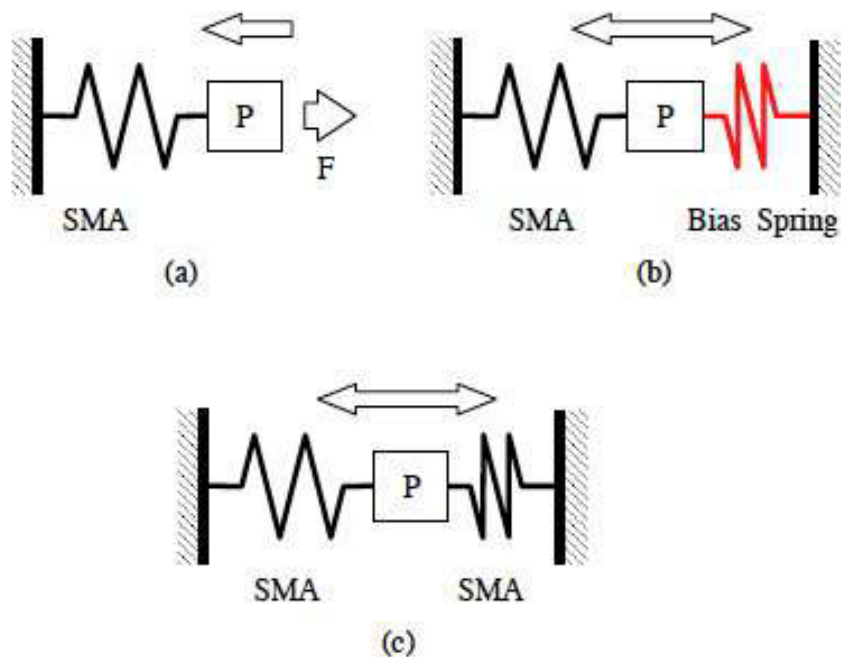


Figura 25 – Tipos Básicos de Atuadores com Efeito de Memória de Forma “One-Way”. a) Atuador de um sentido. b) Atuador Tipo Biased c) Atuador de dois sentidos (Huang, 1998)

Na parte (a), o atuador de um sentido tem funcionamento condicionado à ação de uma força externa capaz de deformar o fio, tornando-o martensítico. Após esta etapa, o fio é aquecido fazendo com que a forma original seja recuperada. Em (b) o atuador é capaz de mover o elemento P em ambas as direções. Neste caso, o elemento de liga de memória de forma é deformado anteriormente a sua instalação no sistema, a frio, estando no estado martensítico. Assim, devido ao módulo de elasticidade baixo desta fase, o fio é capaz de ser deformado pela mola, que a princípio encontra-se indeformada. Uma vez aquecido, o fio retorna à forma original, fazendo com que a mola se expanda. Caso a temperatura seja reduzida novamente, a mola se contrai, estirando o fio. Por fim, em (c), dois elementos de memória de forma são conectados ao elemento P, sendo que um deles deve ser previamente deformado. Dessa forma, aquecendo-os ou resfriando-os de forma coordenada, é possível se obter movimentos nos dois sentidos

Uma das grandes vantagens deste tipo de atuador é a possibilidade de redução de peso e volume dos atuadores. Hirose et al. em 1989, [10] compararam a razão de energia/peso vs. peso de um atuador de ligas com memória de forma com diversos motores convencionais. Observa-se que o atuador analisado possui propriedades não atingíveis com a tecnologia tradicional.

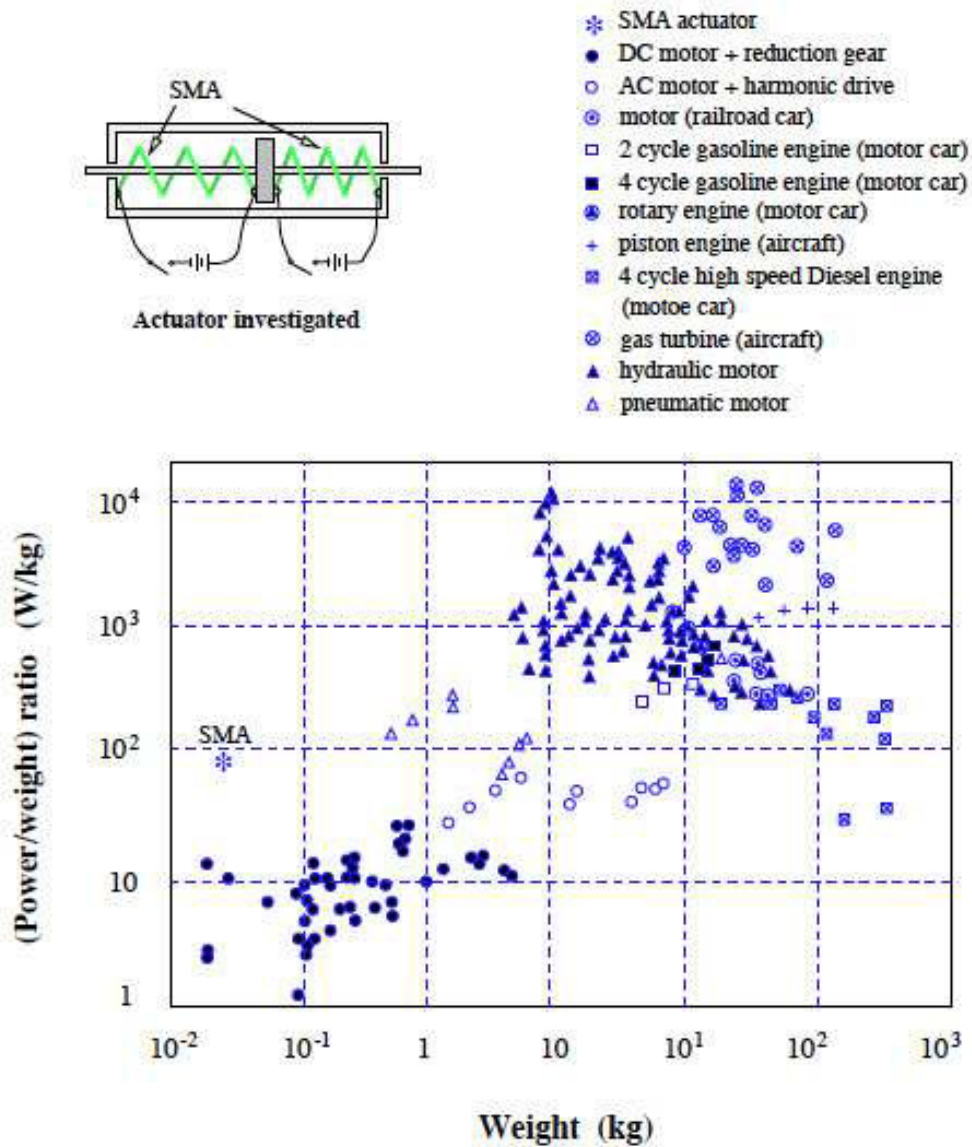


Figura 26 – Diagrama de Energia/Peso vs. Peso de diferentes atuadores (Hirose et al. 1989)

4 Metodologia

Um modelo numérico de conexão flangeada foi desenvolvido com o software de elementos finitos Abaqus, versão 6.10. O modelo restringiu-se ao corpo dos flanges, estojos, porcas, arruelas e anel de vedação. O segmento de tubo ao qual se liga o flange bem como o escoamento dentro deste não foram incluídos na simulação.

O procedimento de carregamento nos flanges proposto tem como fundamento a tração imposta aos parafusos com a recuperação de forma das arruelas. Este efeito é explorado da seguinte forma: comprimem-se as arruelas, de modo a mudar a variante martensítica de M, para M-, reduzindo sua espessura. Com as arruelas ainda comprimidas, segue-se ao procedimento de montagem destas no flange, com o auxílio de porcas que impedem sua translação ao longo do eixo do parafuso. A medida em que trocam calor com o ambiente – mais aquecido que sua estrutura comprimida – as arruelas iniciam sua transformação em austenita e, conseqüentemente, seu retorno à espessura inicial. Desta forma, o movimento de expansão tende a exercer uma força que afasta a porca adjacente às arruelas do flange, também em contato com estas, impondo um tracionamento nos parafusos.

4.1 Descrição do Modelo Matemático da Liga com Memória de Forma

O modelo matemático que descreve o comportamento da liga com memória de forma empregada no trabalho em questão foi desenvolvido por Savi et. al. Este permite que seja simulada uma liga com duas fases macroscópicas: austenita (A), martensita (M), e duas variantes martensíticas, uma induzida por tração (M+) e a segunda induzida por compressão (M-).

O modelo contempla ainda a assimetria tensão-deformação, a plasticidade, a dependência da taxa de carregamento e o acoplamento termomecânico. A apresentação da formulação do modelo segue, de forma resumida:

A energia livre de Helmholtz para cada fase é definida pelas seguintes equações:

$$M^+: \rho\psi_1(\varepsilon_e, T, \gamma, \mu) = \frac{1}{2} E_M \varepsilon_e^2 - \alpha^T \varepsilon_e - \Gamma_1 - \Omega_M (T - T_0) \varepsilon_e + \frac{1}{2} K_M \gamma^2 + \frac{1}{2H_M} \mu^2 \quad (1)$$

$$M^-: \rho\psi_2(\varepsilon_e, T, \gamma, \mu) = \frac{1}{2}E_M\varepsilon_e^2 - \alpha^C\varepsilon_e - \Gamma_2 - \Omega_M(T - T_0)\varepsilon_e + \frac{1}{2}K_M\gamma^2 + \frac{1}{2H_M}\mu^2 \quad (2)$$

$$A: \rho\psi_3(\varepsilon_e, T, \gamma, \mu) = \frac{1}{2}E_A\varepsilon_e^2 - \Gamma_3 - \Omega_A(T - T_0)\varepsilon_e + \frac{1}{2}K_A\gamma^2 + \frac{1}{2H_A}\mu^2 \quad (3)$$

$$M: \rho\psi_4(\varepsilon_e, T, \gamma, \mu) = \frac{1}{2}E_M\varepsilon_e^2 - \Gamma_4 - \Omega_M(T - T_0)\varepsilon_e + \frac{1}{2}K_M\gamma^2 + \frac{1}{2H_M}\mu^2, \quad (4)$$

Onde:

ε_e : parte elástica da deformação;

T: temperatura;

T_0 : temperatura de referência;

γ : variável relacionada ao encruamento isotrópico;

μ : variável relacionada ao encruamento cinemático;

E: módulo elástico;

K: parâmetro de endurecimento isotrópico;

H: parâmetro de endurecimento cinemático;

Ω : coeficiente de expansão térmica;

Estas equações fornecem as contribuições relativas à cada fase presente no material, em relação à deformação elástica, dilatação térmica e deformação plástica.

Considerando-se que há uma mistura no material entre as frações volumétricas contempladas pelo modelo, definidas por β_1 , β_2 , β_3 e β_4 , respectivamente referentes a M^+ , M^- , A e M, é possível relacioná-las de forma que: $\beta_4 = 1 - \beta_1 - \beta_2 - \beta_3$. Assim, uma função geral para energia livre de Helmholtz é apresentada da seguinte forma:

$$\tilde{\psi}(\varepsilon_e, T, \gamma, \mu) = \sum_{k=1}^3 \beta_n \psi_k + \tilde{J}_\Pi(\beta_1, \beta_2, \beta_3) + \tilde{J}_\Xi(\dot{\beta}_1, \dot{\beta}_2, \dot{\beta}_3) \quad (5)$$

Nesta equação, \tilde{J}_Π e \tilde{J}_Ξ são funções indicatrizes relativas aos conjuntos convexos Π e Ξ , que fornecem as relações de coexistência entre as fases e suas variantes e restrições de transformações de fase não observadas experimentalmente. Com a função de Energia Livre de Helmholtz generalizada e as relações provenientes

das funções indicatrizes, podem-se determinar as equações constitutivas que descrevem a evolução temporal do material da seguinte forma:

$$\begin{aligned}\eta_1 \dot{\beta}_1 = & \alpha^T (\varepsilon - \varepsilon^p) - \Lambda_1 - [2\alpha_h^T \alpha^T + E(\alpha_h^T)^2] \beta_1 + (\alpha_h^C \alpha^T + \alpha_h^T \alpha^C + E\alpha_h^T \alpha_h^C) \beta_2 + \\ & + \alpha_h^T [E(\varepsilon - \varepsilon_p) - \Omega(T - T_0)] + \\ & + \eta_{ci} K \gamma + \eta_{ck} \frac{1}{H} \mu - \frac{\partial J_\Pi}{\partial \beta_1} + \eta_T \frac{\partial J_\Xi}{\partial \beta_1}.\end{aligned}\quad (6)$$

$$\begin{aligned}\eta_2 \dot{\beta}_2 = & -\alpha^C (\varepsilon - \varepsilon^p) - \Lambda_2 - (\alpha_h^T \alpha^C + \alpha_h^C \alpha^T + E\alpha_h^T \alpha_h^C) \beta_1 + \\ & + [2\alpha_h^C \alpha^C + E(\alpha_h^C)^2] \beta_2 + \alpha_h^C [E(\varepsilon - \varepsilon_p) - \Omega(T - T_0)] + \\ & + \eta_{ci} K \gamma + \eta_{ck} \frac{1}{H} \mu - \frac{\partial J_\Pi}{\partial \beta_2} + \eta_T \frac{\partial J_\Xi}{\partial \beta_2}\end{aligned}\quad (7)$$

$$\begin{aligned}\eta_3 \dot{\beta}_3 = & -\frac{1}{2} (E_A - E_M)(\varepsilon - \varepsilon^p - \alpha_h^T \beta_1 + \alpha_h^C \beta_2)^2 + \Lambda_3 + \\ & + (\Omega_A - \Omega_M)(T - T_0)(\varepsilon - \varepsilon^p - \alpha_h^T \beta_1 + \alpha_h^C \beta_2) + \\ & - \frac{1}{2} (K_A - K_M) \gamma^2 + \left(\frac{1}{2H_M} - \frac{1}{2H_A} \right) \mu^2 + \\ & + \eta_{ci} K \gamma + \eta_{ck} \frac{1}{H} \mu - \frac{\partial J_\Pi}{\partial \beta_3} + \eta_A \frac{\partial J_\Xi}{\partial \beta_3}.\end{aligned}\quad (8)$$

$$\varepsilon^p = \lambda \frac{(\sigma - \mu)}{|\sigma - \mu|} \quad (9)$$

$$\dot{\gamma} = |\varepsilon^p| + \eta_{ci} (\dot{\beta}_1 + \dot{\beta}_2 - \dot{\beta}_3) \quad (10)$$

$$\dot{\mu} = H |\varepsilon^p| + \eta_{ck} (\dot{\beta}_1 + \dot{\beta}_2 - \dot{\beta}_3) \quad (11)$$

4.2 Descrição do Modelo Numérico

4.2.1 Geometria

Para a simulação da aplicação de cargas nos estojos de flanges empregados em conectores submarinos foi desenvolvido um modelo de flange de 8”, aplicável em equipamentos submarinos de produção de petróleo. As medidas empregadas na modelagem foram extraídas da norma API Specification 17D, para o corpo do flange e estojos, e de API Specification 6A, para o rasgo no flange e anel de vedação.

Algumas simplificações foram adotadas na geometria dos estojos, porcas e flanges. A rosca que garante o contato entre estojos e porcas foi eliminada de modo a se simplificar a simulação. Visto que o foco desta não é a distribuição de cargas no contato rosqueado dos estojos, este foi substituído por condições de contorno apropriadas. Uma extremidade dos estojos teve a porca solidária a seu corpo, enquanto a segunda ficou separada. Além disso, as porcas foram consideradas como corpos de seção transversal constante e hexagonal, sem variações nas extremidades. A figura 27 ilustra estojos e porcas.

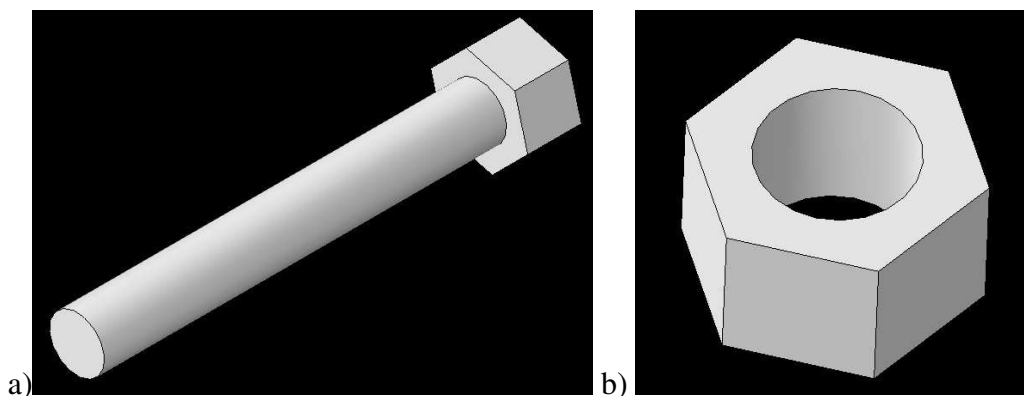


Figura 27 – Ilustrações de : a)Estojo b) Porca

Quanto aos flanges, uma pequena simplificação foi adotada nos ressaltos. No lugar do acabamento suave foi empregado um segmentado, aproximando o desenho da curva por duas retas. A figura 28 ilustra a geometria dos flanges.

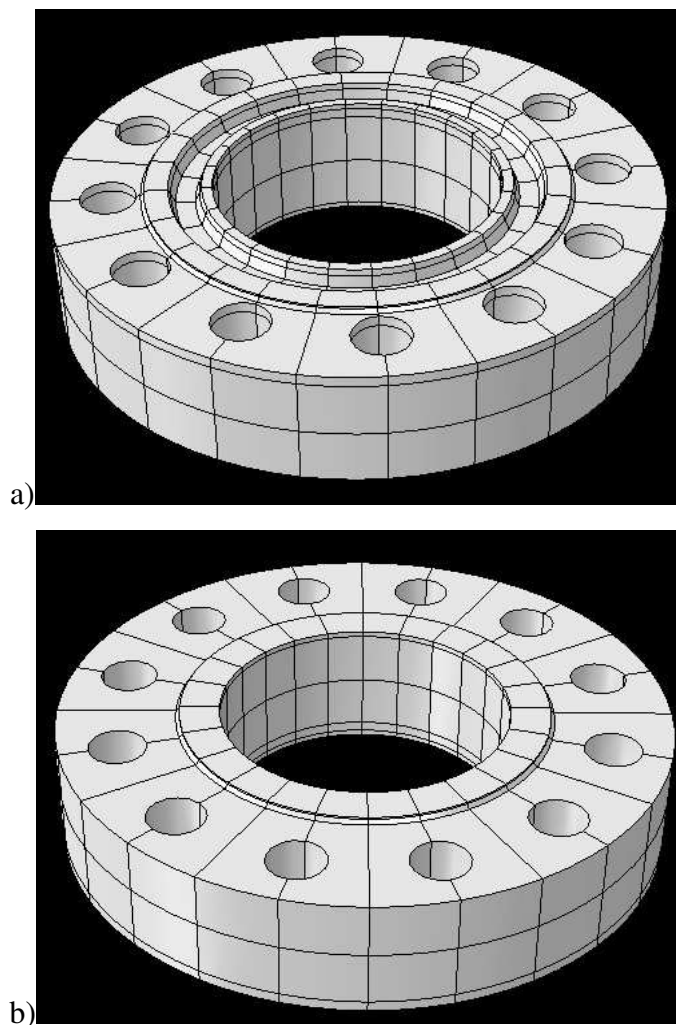


Figura 28 – Ilustrações de a) Flange Visto por Cima (encaixe do anel de vedação) b) Flange Visto por Baixo

As arruelas simuladas com SMA, desenvolvidas especificamente para o presente trabalho, foram modeladas empregando-se diferentes tipos de elementos. Devido a inexistência de materiais com as propriedades de ligas com memória de forma entre os materiais padrão de simulação com Abaqus, foi empregada uma subrotina desenvolvida, por Monteiro Jr., 2007 [1], com Fortran que descreve o comportamento termomecânico destes materiais em 1-D. Logo, houve a necessidade de combinação de elementos de treliça com o modelo de flange 3-D. Isto foi realizado com a integração de bases tridimensionais com fios unidimensionais de liga com memória de forma. A área equivalente à superfície das bases foi dividida igualmente entre os 16 fios, simetricamente dispostos entre as bases (embora a visualização disponível no software apresente fios 1D). As dimensões escolhidas para as bases foram de 75mm para o diâmetro externo e 41mm para o diâmetro interno. Já a espessura deve ser determinada de acordo com a carga que se deseja obter nos parafusos e será discutida nos resultados. A figura 29 representa uma arruela com 50mm de espessura:

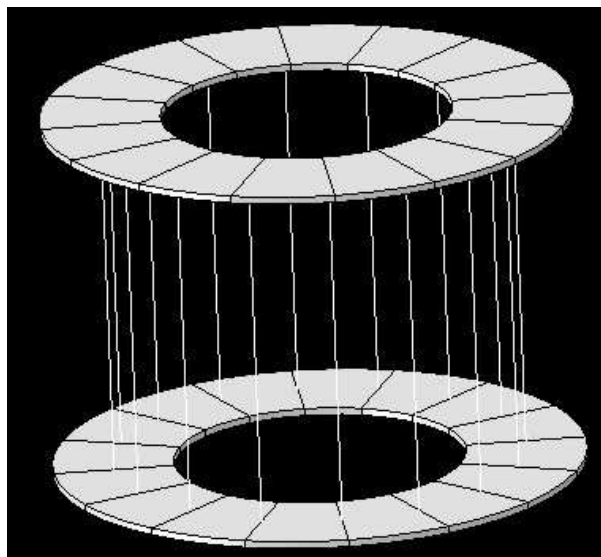


Figura 29 – Ilustração da Arruela Desenvolvida para Simulação (50mm)

Por fim, o anel teve sua geometria reproduzida exatamente de acordo com especificação da norma, com exceção do pequeno orifício presente em sua estrutura para equalização da pressão nos dois lados do rasgo. Isto é razoável pois a simulação executada no trabalho não contempla o escoamento de fluidos pelo flange, nem pressão interna ou externa. A figura 30 ilustra o anel.

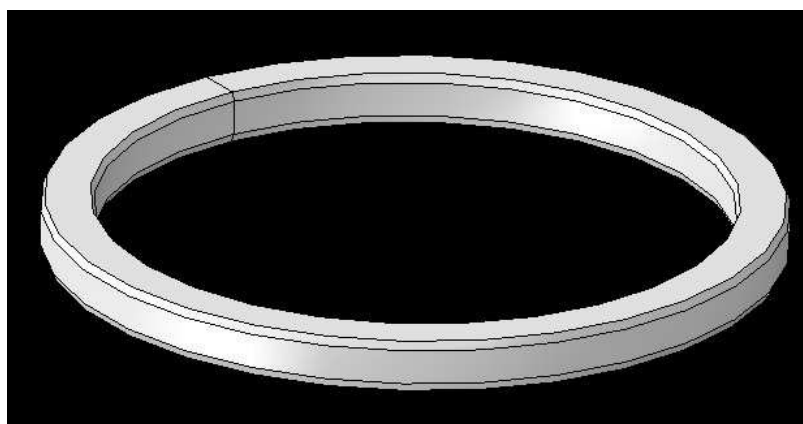
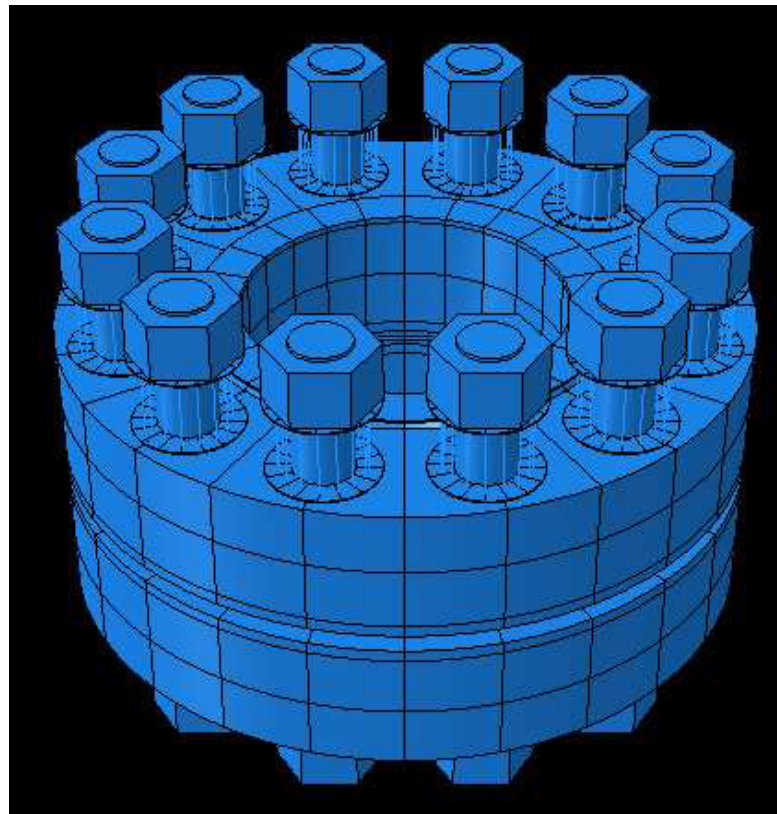
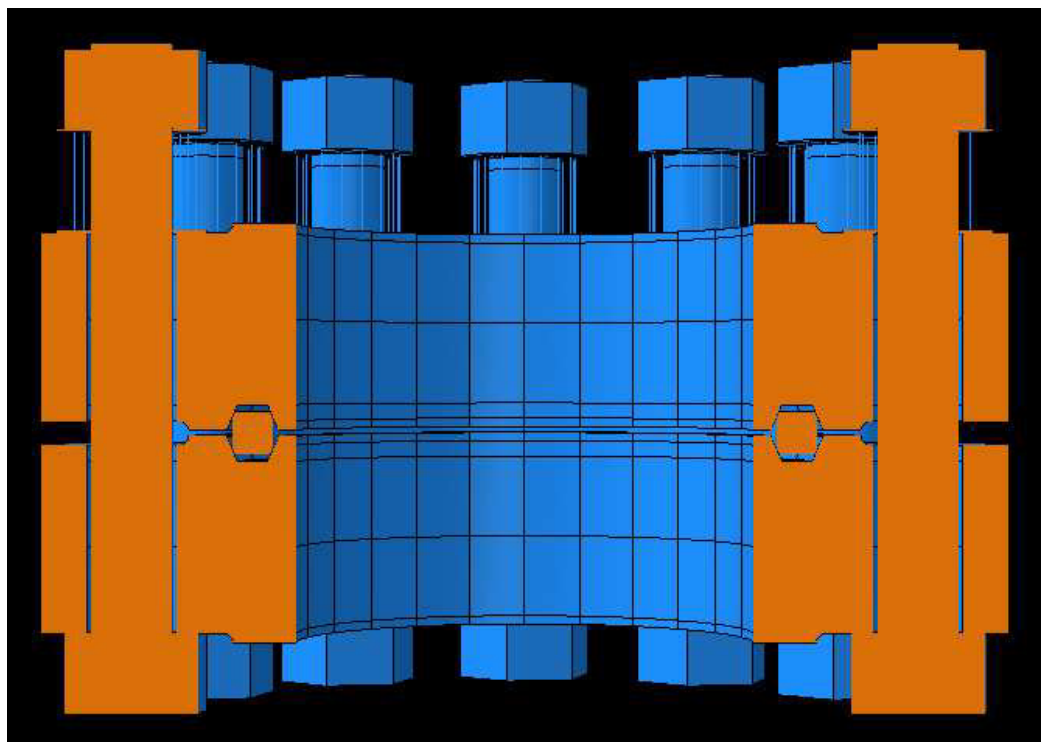


Figura 30 – Ilustração do Anel de Vedação

Uma vez completa a montagem das partes descritas, gerou-se o seguinte modelo de conexão flangeadas, representado pela figura 31:



a)



b)

Figura 31 – a) Montagem do Flange b) Montagem do Flange em Corte (visualização do anel de vedação)

4.2.2 Material

Diferentes materiais foram empregados no modelo. Ao corpo dos flanges, bem como aos estojos, às porcas e às bases das arruelas foi associado um material elástico com Módulo de Elasticidade de 210 GPa e Coeficiente de Poisson de 0,3. Admitiu-se que os efeitos da plasticidade nestes elementos não é de interesse para a simulação em questão.

O anel de vedação foi simulado com aço 316L, material indicado para este uso por ser mais macio que o material de que é feito o flange. O comportamento no regime plástico deste elemento, ao contrário, é fundamental para a simulação, pois sua deformação permanente relaciona-se diretamente com a capacidade de vedação. Os dados de tensão verdadeira vs. deformação deste aço foram obtidos com teste realizado no Laboratório de Tecnologia Submarina, e descrevem a seguinte curva da figura 32:

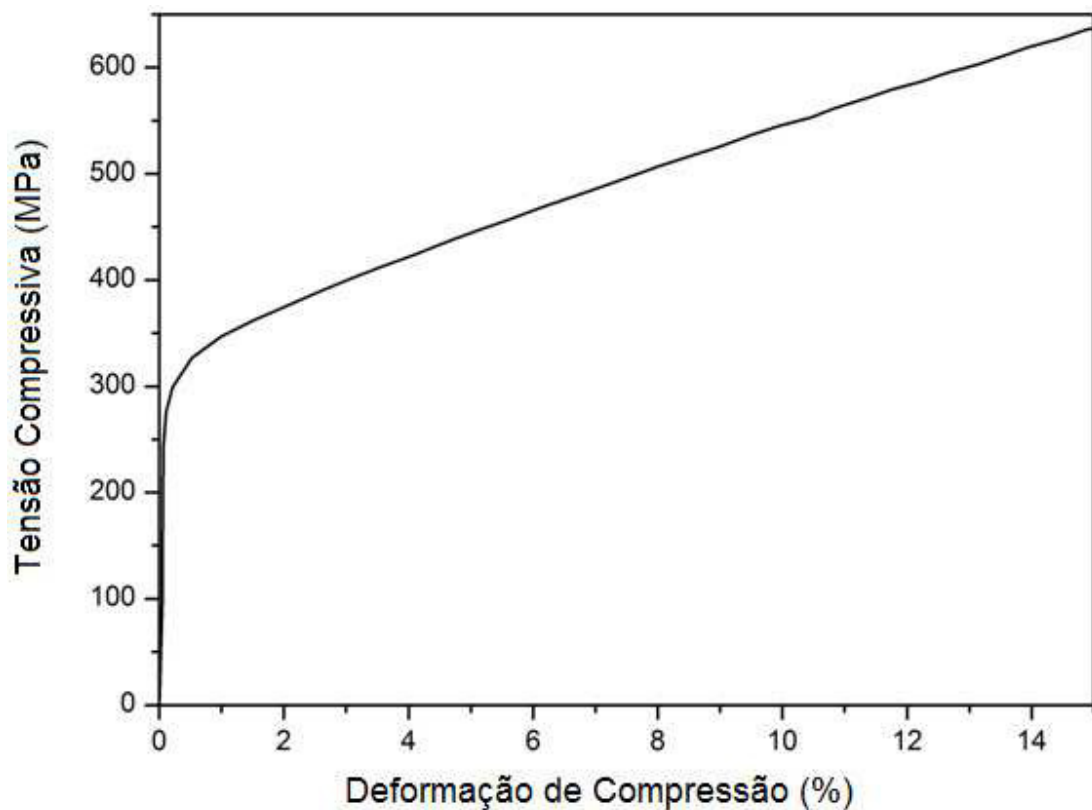


Figura 32 – Gráfico de Tensão Verdadeira vs. Deformação do Aço Empregado no Anel de Vedação

Por fim, os parâmetros do comportamento termomecânico do material com memória de forma presente nos fios das arruelas foi extraído de Tobushi et al., [11]. O gráfico de tensão vs. deformação vs. temperatura está ilustrado da figura 33.

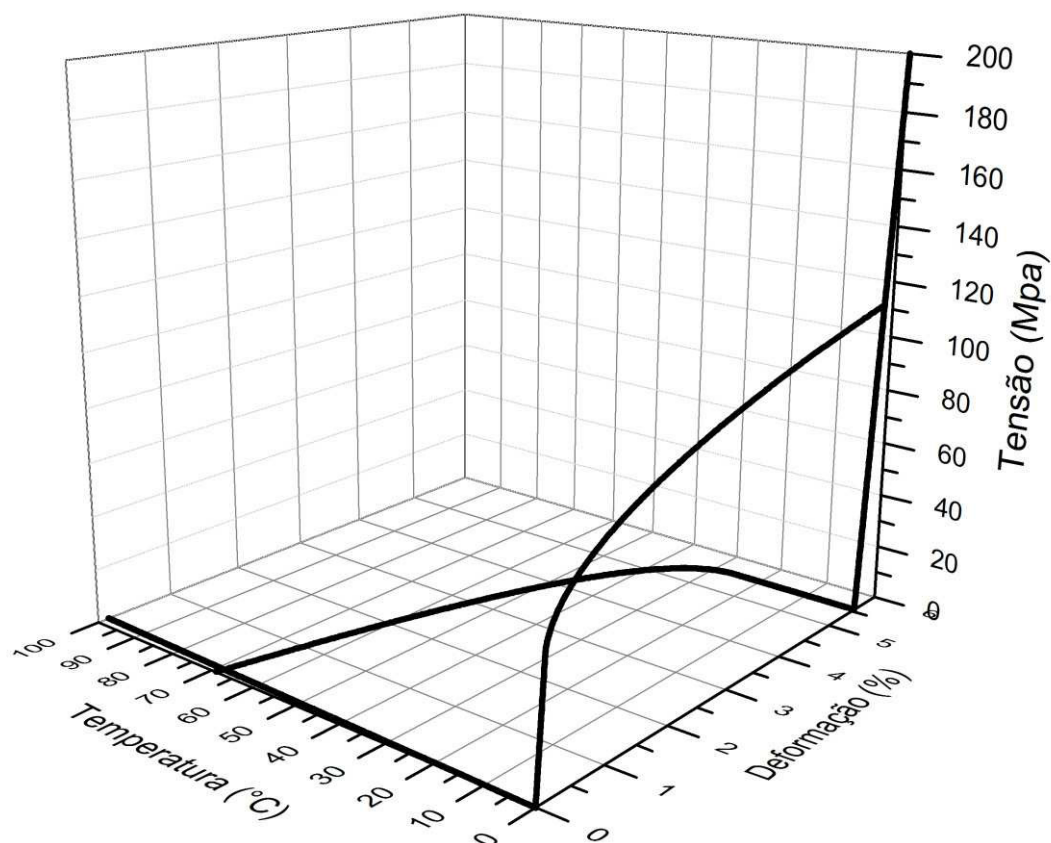


Figura 33 – Gráfico Tensão vs. Deformação vs. Temperatura da Liga com Memória de Forma
Utilizada na Simulação Numérica

4.2.3 Malha

A malha de elementos finitos foi desenvolvida a partir de elementos sólidos, tridimensionais, hexaédricos, denominados C3D8R, com exceção dos fios de memória de forma, que possuem elementos de treliça tridimensional, denominados T3D2.

Os elementos C3D8R são elementos hexaédricos lineares de uso geral com integração reduzida a um ponto, no centro do elemento. Com isso, ao contrário do elemento C3D8 que possui 8 pontos de integração, este proporciona grande economia de tempo computacional. Para que produza resultados satisfatórios, no entanto, é preciso que a malha composta por C3D8R possua elementos suficientemente pequenos para que as tensões e deformações – mais precisas no ponto de integração – sejam capturadas. A figura 34 faz a comparação dos pontos de integração presentes no elemento C3D8R (à esquerda) e C3D8 (à direita)

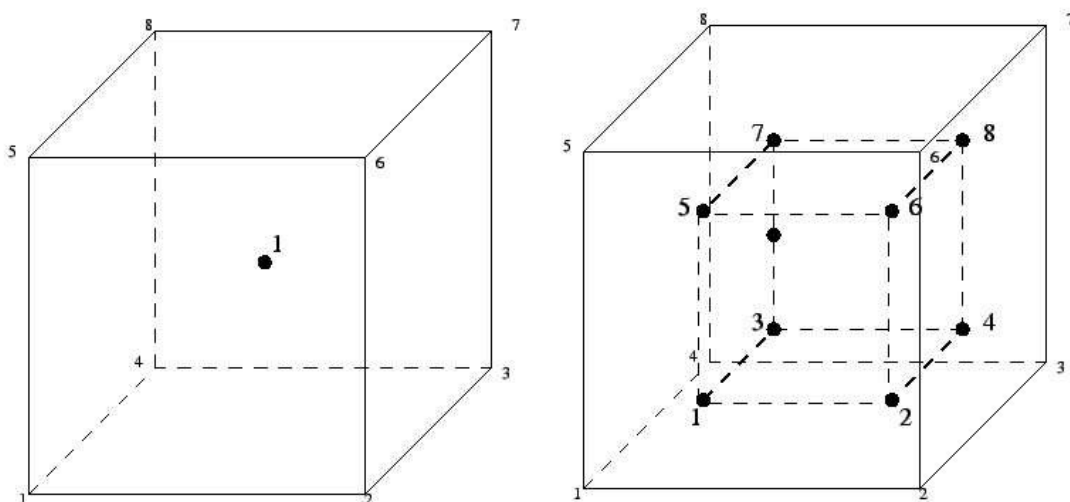


Figura 34 – Desenhos Comparativos dos Elementos C3D8 (direita) e C3D8R (esquerda).

(web.mit.edu, 2012)

Já os elementos T3D2, são elementos 3-D usados para modelar estruturas delgadas que suportam apenas carregamento no eixo de sua linha central. Momentos e forças perpendiculares à linha não são suportados. Este elemento possui dois nós, um em cada extremidade e usa interpolação linear para posição e deslocamento. Ao longo de seu comprimento a tensão é constante.

Quanto ao refinamento da malha, os diferentes componentes da conexão apresentaram valores particulares. Os flanges, estojos e porcas foram divididos em elementos hexaédricos de 20 mm de lado, salvo em regiões em que a geometria complexa resultou em elementos de geometria irregular. O anel de vedação tem malha mais refinada, com elementos hexaédricos de 7 mm de lado, para que as tensões altamente concentradas em sua estrutura possam ser analisadas. Já as arruelas foram divididas de modo que os fios de memória de forma possuísem apenas um elemento de treliça cada, e as bases elementos sólidos limitados cujas extremidades foram limitadas pela posição de ancoramento dos fios. As figuras 35, 36, 37 e 38 são representativas da malha de elementos finitos empregada nas simulações.

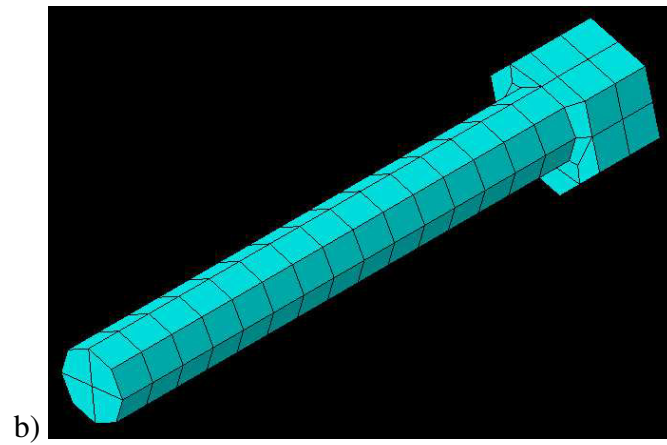
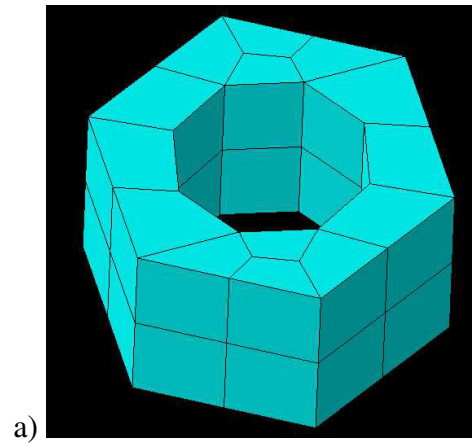


Figura 35 – Malha de Elementos Finitos de a) Porca e b) Estojo

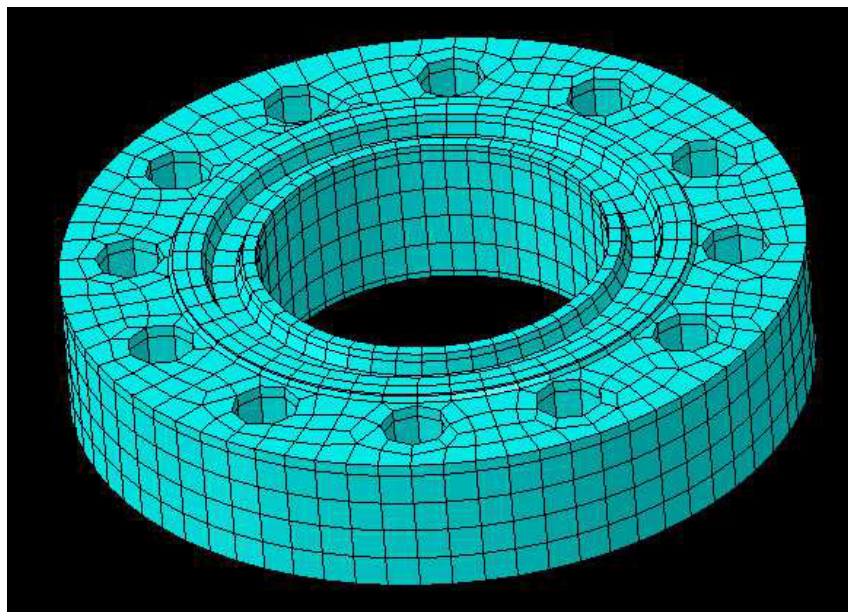


Figura 36 – Malha de Elementos Finitos do Flange

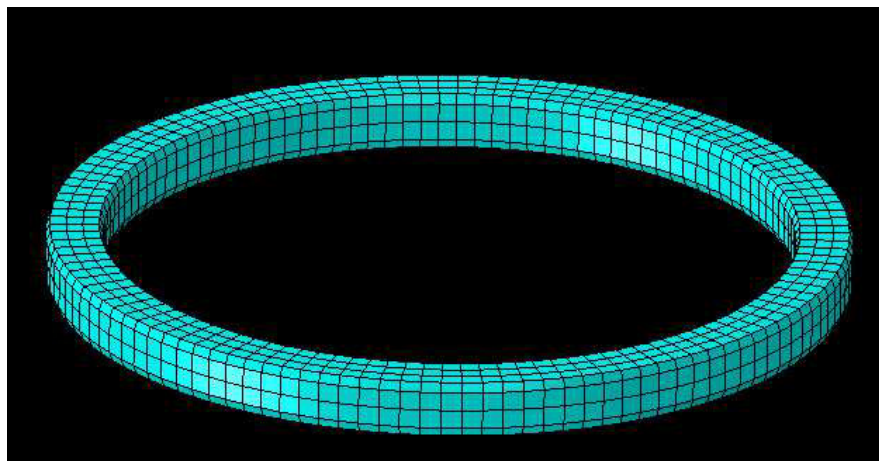


Figura 37 – Malha de Elementos Finitos do Anel de Vedação

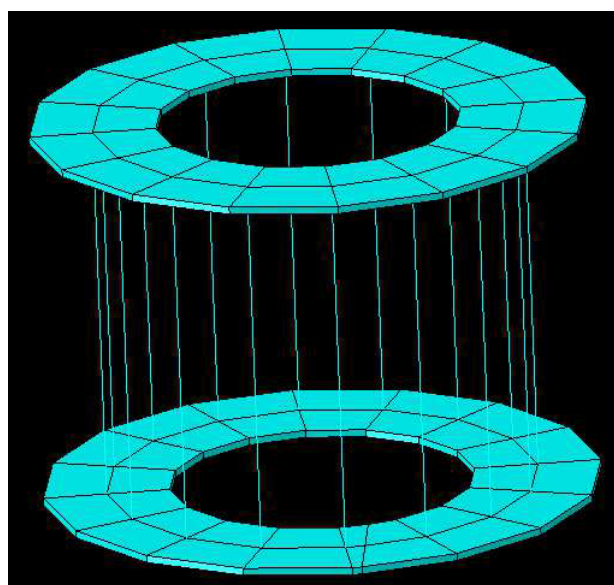


Figura 38 – Malha de Elementos Finitos das Arruelas de Liga com Memória de Forma

4.2.4 Superfícies de Contato

A todas as superfícies de contato do modelo foram associadas as mesmas propriedades. Considerou-se que, quanto aos movimentos tangenciais entre as faces, não há atrito. Além disso, definiu-se que em relação aos movimentos normais, a propriedade do contato seria do tipo hard, que implica que qualquer pressão pode ser transmitida entre as faces. No modo padrão, este tipo de propriedade prevê que, quando as faces estão a uma distância zero, há início da transmissão de pressão. Ao contrário, quando a pressão é zerada, considera-se que as faces não estão mais em contato. Desta forma, nenhuma penetração entre as superfícies é permitida pela simulação.

Entretanto, uma pequena modificação foi incorporada a este tipo de propriedade foi estabelecida para facilitação do processo numérico. O método de

reforço de restrição do contato foi estabelecido de forma que a pressão transmitida seja proporcional à distância de penetração entre as duas superfícies. Com isso, há transmissão de pressão antes que as superfícies entrem efetivamente em contato, a uma distância determinada C_0 e a rigidez do contato cresce não linearmente até atingir um valor final, a uma sobreposição equivalente a uma distância d . Cabe ressaltar que estas distâncias são muito pequenas em relação ao tamanho dos elementos. A figura 39 representa em (a), o contato do tipo hard tradicional enquanto a (b) representa a propriedade do contato com a alteração aplicada na simulação.

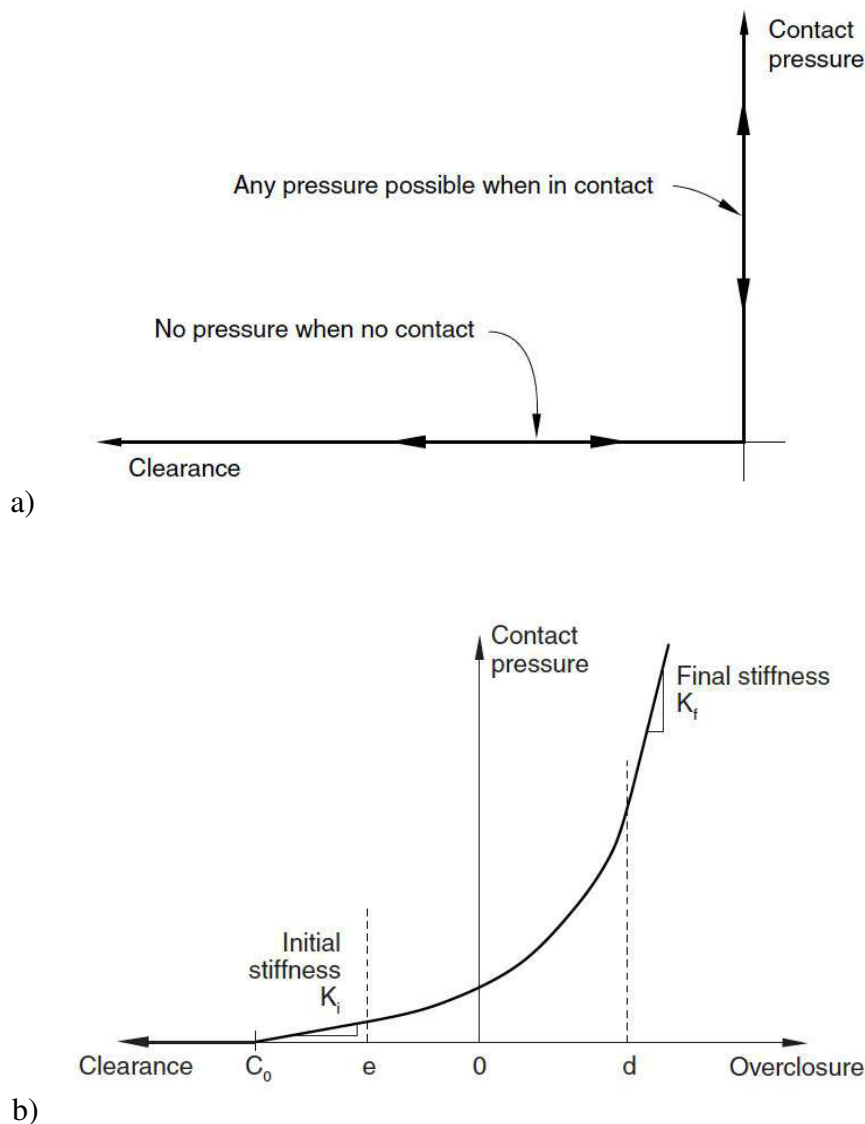


Figura 39 – a) Propriedade Padrão de Contato b) Propriedade de Contato Empregada na Simulação

(Abaqus Analysis User's Manual)

4.2.5 Carregamento e Condições de Contorno

Duas etapas distintas de carregamentos e condições de contorno são identificadas no modelo. A primeira se deve ao procedimento de pré-carregamento das arruelas. Nesta fase, há dois passos distintos. No primeiro garante-se que o material com memória de forma seja comprimido e mude de variante martensítica de M para M-. A carga é transmitida às arruelas por meio das porcas adjacentes a elas. Neste passo, todas outras regiões do modelo tem condições de contorno tais que não sejam deformadas. A figura 40 ilustra o carregamento descrito:

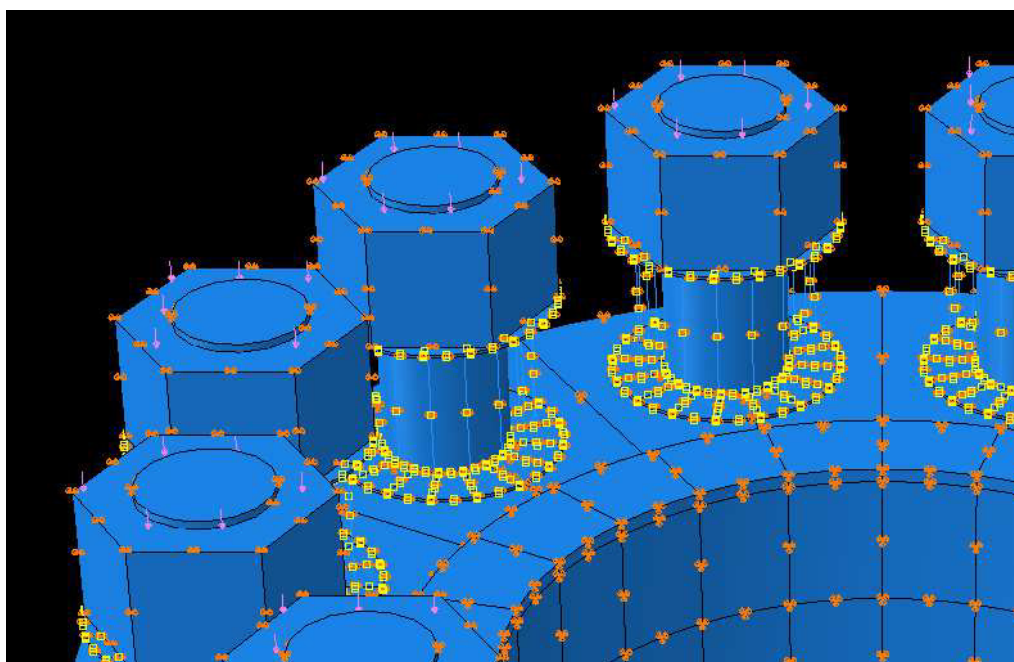


Figura 40 – Pré-carregamento das Arruelas. As setas roxas indicam o sentido de aplicação de pressão.

No passo subsequente o carregamento é removido e, uma vez que a deformação elástica das partes comprimidas é revertida, determinam-se as posições definitivas das arruelas e porcas no modelo. É importante ressaltar que esta etapa não corresponde ao processo proposto para aplicação de carga no flange, mas condiciona o modelo para a simulação de carregamento por expansão das arruelas. Quando aplicado na prática, o procedimento deve ter arruelas comprimidas anteriormente à sua montagem na conexão.

Após este processo, as arruelas estão preparadas e posicionadas para que sejam submetidas ao aquecimento. Neste momento as condições de contorno são tais que todas as partes do modelo, com exceção do anel, só tenham liberdade de movimento no eixo paralelo ao da expansão das arruelas. O anel, por sua vez, não

tem movimentos restritos em nenhuma direção, visto que sofre grandes deformações em todas as direções, no processo.

Para que a carga seja aplicada sem a presença do rosqueamento entre porcas e parafusos, define-se que as superfícies de contato entre eles não apresentam movimentos relativos. Além disso, para que o modelo não possua movimentos de corpo rígido, faz-se com que as porcas de uma extremidade dos parafusos não possuam movimentos livres em nenhuma direção.

Uma vez que estas condições de contorno sejam definidas, aquecem-se as arruelas, variando-se sua temperatura linearmente ao longo de um step de aquecimento. Neste, ocorre a recuperação da deformação e consequente carregamento dos parafusos.

5 Resultados

5.1 Verificação do Modelo Matemático das Ligas com Memória de Forma

Para que a simulação das ligas com memória de forma seja válida, é preciso verificar se o modelo matemático proposto está de acordo com o seu comportamento real. Visto que o presente trabalho não contemplou procedimentos experimentais, utilizaram-se os resultados obtidos por Tobushi et al., em 1991 para comparação com o modelo numérico.

Os seguintes parâmetros foram empregados na liga utilizada nas simulações numéricas:

Tabela 1 – Parâmetros do Modelo Matemático das Ligas com Memória de Forma

Propriedades e Parâmetros do Modelo			
E_A (GPa)	65	L_0 (MPa)	0,1
E_M (GPa)	25	L (MPa)	20
Ω_M (kPa/K)	170	L_0^A (MPa)	0,1
Ω_A (kPa/K)	740	L^A (MPa)	900
ε_R	0,055	η_1^C (MPa.s)	1
T_A (K)	300	η_1^D (MPa.s)	2,7
T_M (K)	273	η_3^C (MPa.s)	1
α (MPa)	330	η_3^D (MPa.s)	2,7
c (J/kg K)	600	ρ (g/cm ³)	6,45

Onde:

E : Módulo elástico;

Ω : Parâmetro relativo à razão entre dilatação térmica e tensão;

ε_R : Deformação residual;

T_A : Temperatura acima da qual a austenita é estável;

T_M : Temperatura abaixo da qual a martensita é estável;
 α : Parâmetro associado à energia dissipada durante o ciclo de histerese;
 c : Calor específico do material
 L : Parâmetro de referência para controle da tensão crítica;
 η : Parametro de dissipação
 ρ : Massa Específica

Os testes experimentais usados como referência foram elaborados a 100°C, ou seja, 373K. Assim, o material encontra-se 100% austenítico, de acordo com as propriedades da liga mencionadas. Não foram explorados, portanto, os efeitos de variação de temperatura, mas de tensão na liga.

Espera-se que, a princípio, a liga encontre-se 100% austenítica e, de acordo com o aumento da tensão em sua estrutura, torne-se martensita e sofra grandes deformações no processo. À medida que a tensão é retirada do corpo, a martensita não se torna mais estável e o corpo experimenta o retorno à fase austenítica, recuperando a deformação obtida. Este efeito foi descrito na seção sobre pseudoelasticidade. A figura 41 contém o gráfico comparativo do procedimento de carregamento e descarregamento:

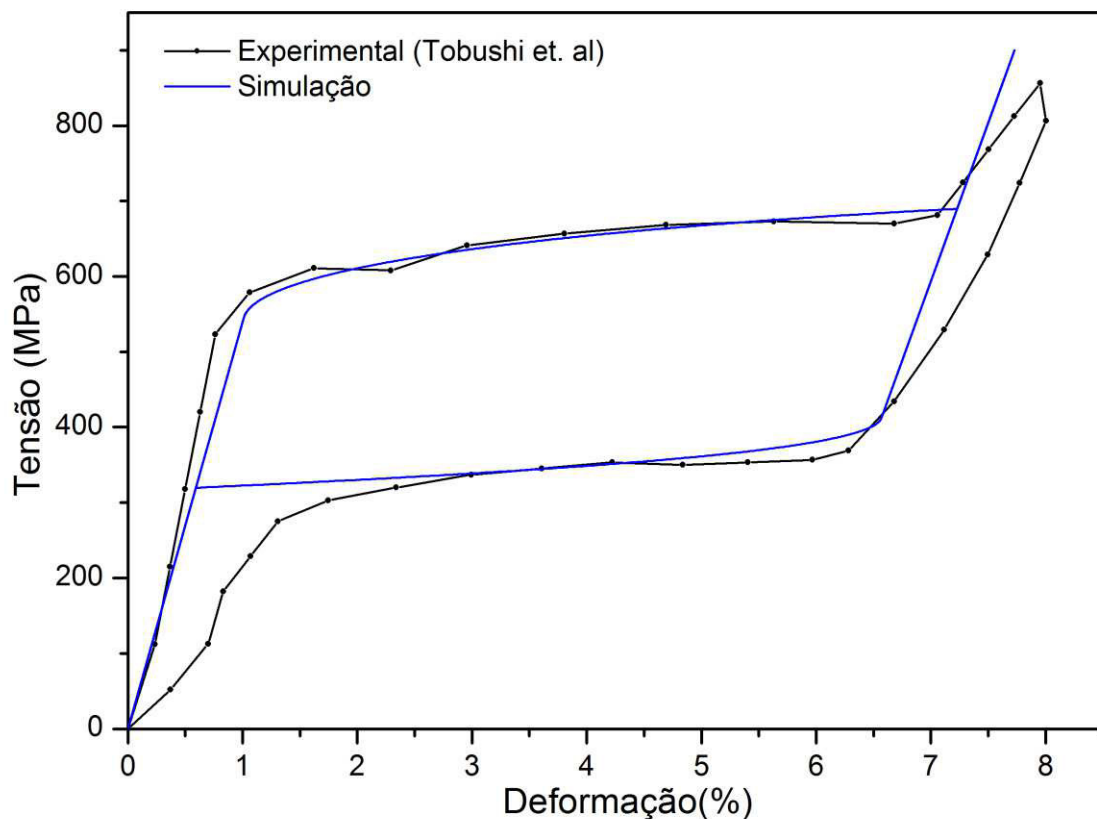


Figura 41 – Gráfico Comparativo de Tensão vs. Deformação, a 373K

Observa-se que, embora os resultados não sejam exatamente idênticos, há uma correlação bastante significativa entre os traçados experimental e numérico dos gráficos. As temperaturas de transição de fase, bem como as deformações recuperáveis do modelo matemático são julgadas suficientemente próximas do experimental para que os resultados da simulação estejam de acordo com a realidade.

5.2 Pré-Carregamento das Arruelas

Embora não faça parte do procedimento de carregamento do flange, o primeiro passo da simulação compreendeu o pré-carregamento das arruelas. Isto pois o procedimento de aplicação de carga nos estojos proposto prevê a utilização de arruelas cujas estruturas sofreram deformações residuais de compressão. Para este procedimento, foi fundamental que se isolasse a aplicação de carga do anel de vedação, de modo a se impedir que este sofresse deformações plásticas anteriores ao procedimento de carregamento dos estojos. Assim, as condições de contorno desta etapa são distintas das atuantes no modelo durante o carregamento dos estojos.

A tensão necessária para que a os fios presentes nas arruelas transformem-se completamente em martensita a 273K é de cerca 115 MPa. Desta forma, uma tensão suficientemente alta foi aplicada às porcas, que transferiram os esforços aos fios compostos por liga com memória de forma. Seguiu-se a este procedimento um passo de descarregamento, para que a deformação elástica fosse revertida, restando-se no material apenas a componente residual da deformação, que correspondeu a cerca de 5,5% da espessura inicial dos fios. Os gráficos das figuras 42 e 43 representam a tensão vs. deformação observadas na estrutura, bem como a evolução das variantes de martensita, M a M' , durante os passos de aplicação e remoção da carga.

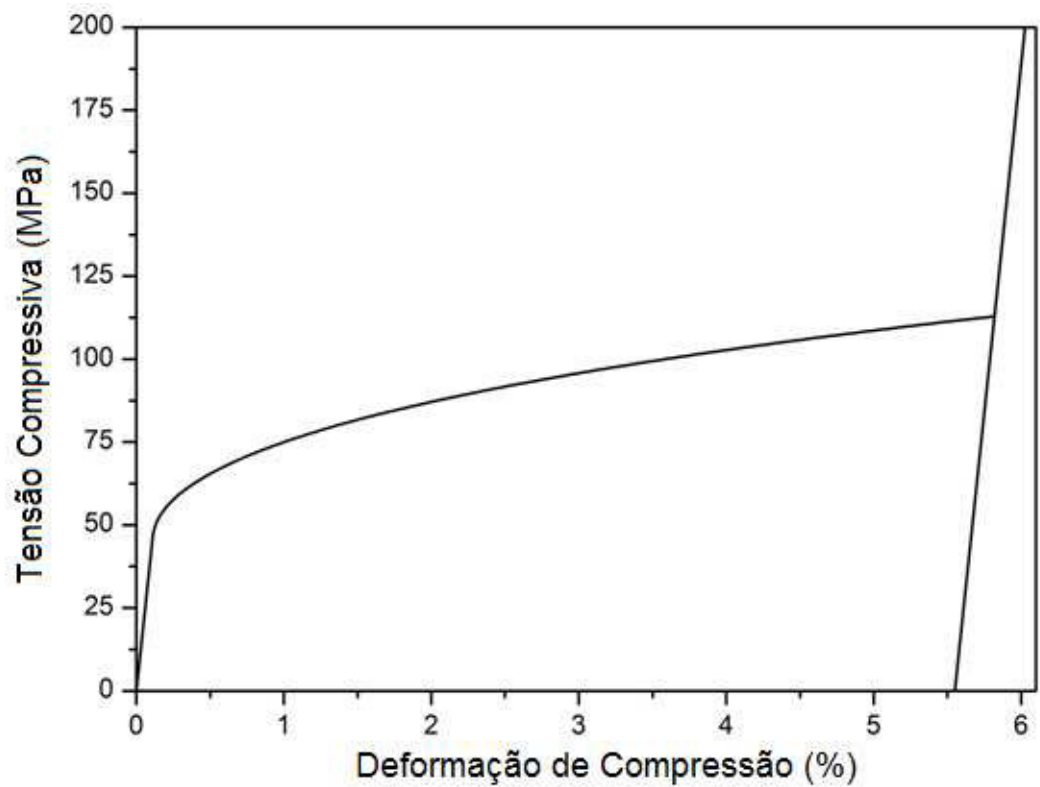


Figura 42 – Gráfico de Tensão vs. Deformação durante a aplicação e remoção da carga

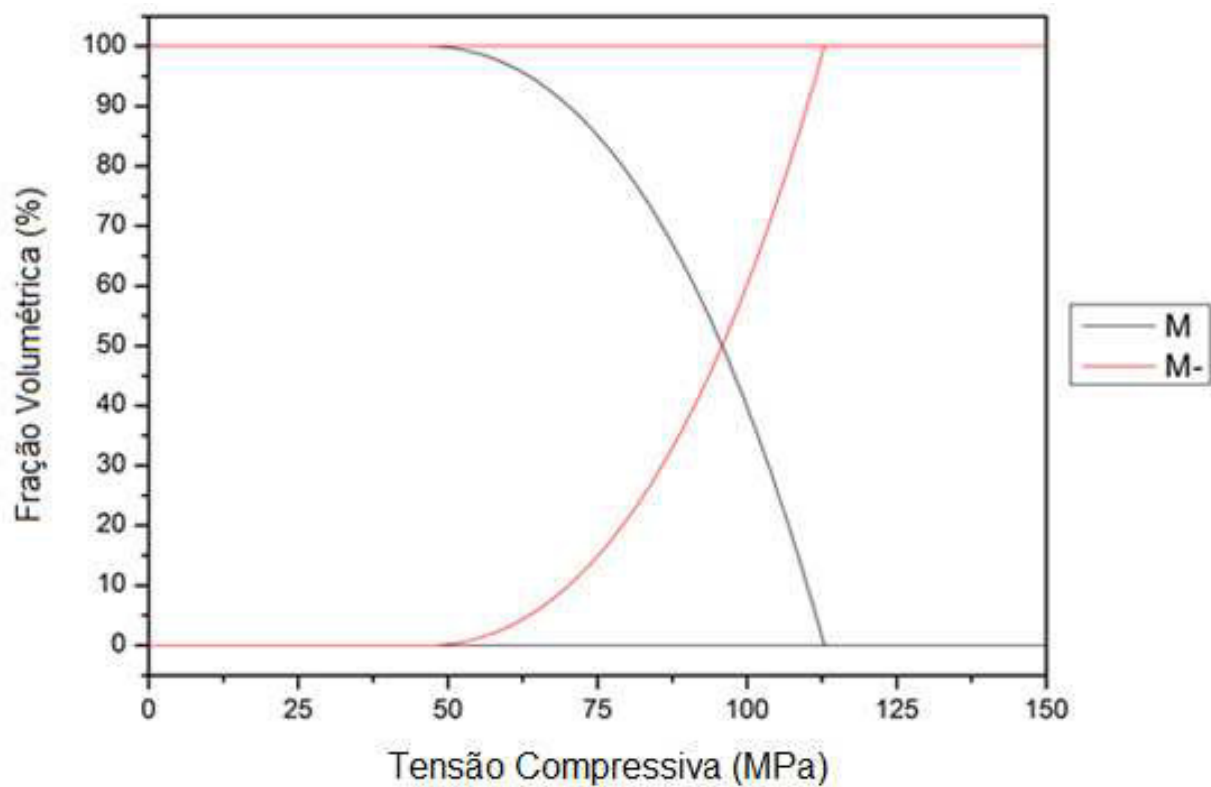


Figura 43 –Frações Volumétricas M e M- vs. Tensão nas arruelas, durante a aplicação e remoção da carga

5.3 Determinação da Espessura das Arruelas

Uma vez determinado o modelo numérico a ser usado, é importante que o este seja calibrado de modo a se atingir o carregamento alvo nos parafusos. No caso simulado, esta carga equivale a 45T, o que, em um parafuso de seção transversal circular de raio 20,5mm representa uma tensão de aproximadamente 334,4 MPa.

Para que isto seja feito, deve-se alterar a espessura das arruelas. Este fato se dá pois o método de carregamento proposto prevê que o tracionamento dos estojos seja decorrente da recuperação da deformação residual das arruelas. Nas ligas com memória de forma, esta corresponde a um valor fixo, que, no caso simulado, é de cerca de 5,5%. Para que se possa alterar o valor da carga nos estojos, portanto, deve-se fazer com que a deformação recuperada, em termos absolutos, se altere. Isto é possível com a variação da espessura das arruelas.

Portanto, simulações do procedimento de aperto foram elaboradas, com arruelas distintas. Determinou-se que os testes incluíam arruelas de espessura de 30mm, variando-se de 10 em 10mm para análise da evolução das tensões nos parafusos. As deformações recuperáveis nestes casos seguem os valores da tabela 2, a seguir:

Tabela 2 – Deslocamentos nas Arruelas de Acordo com a Espessura

Espessura (mm)	Deslocamento (mm)
30	1,65
40	2,2
50	2,75
60	3,3
70	3,85
80	4,4

É válido ressaltar que, entre os testes simulados, não só a espessura da arruela é variável, mas também o comprimento dos estojos, para que estes possam se acomodar. Desta forma, os estojos dos testes com a arruela de 30mm tem 315mm de comprimento – 10mm a mais que dimensão tradicional dos estojos da conexão flangeada analisada, de 305mm – e 10mm são adicionados a este valor para cada aumento equivalente nas arruelas.

Seguem ilustrações, nas figuras 44, 45, 46, 47, 48, 49 e 50, das tensões de Von Mises nos elementos da conexão flangeada obtidas com o uso das arruelas com

diferentes espessuras. A mesma escala de tensões foi empregada em todas as ilustrações, para efeito de comparação.

- Arruela de 30mm

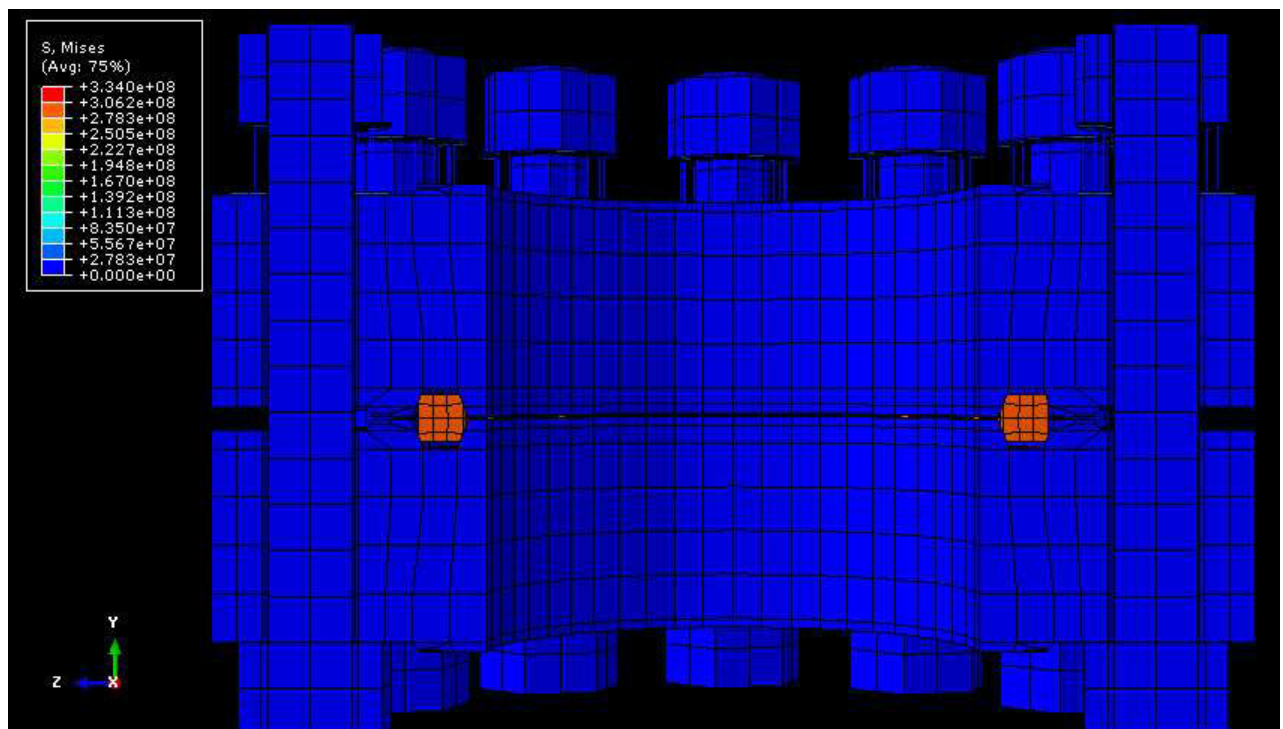


Figura 44 – Tensão de Von Mises na Conexão Flangeada com Arruela de 30mm

- Arruela de 40mm

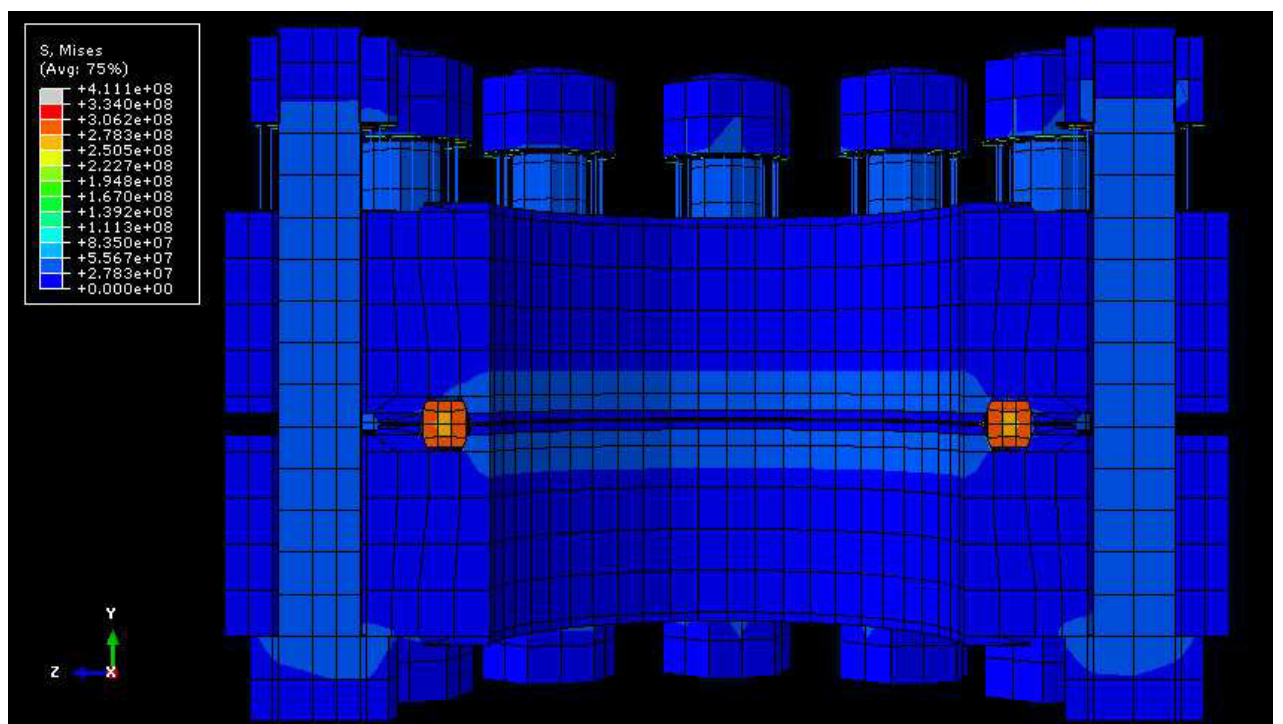


Figura 45 - Tensão de Von Mises na Conexão Flangeada com Arruela de 40mm

- Arruela de 50mm

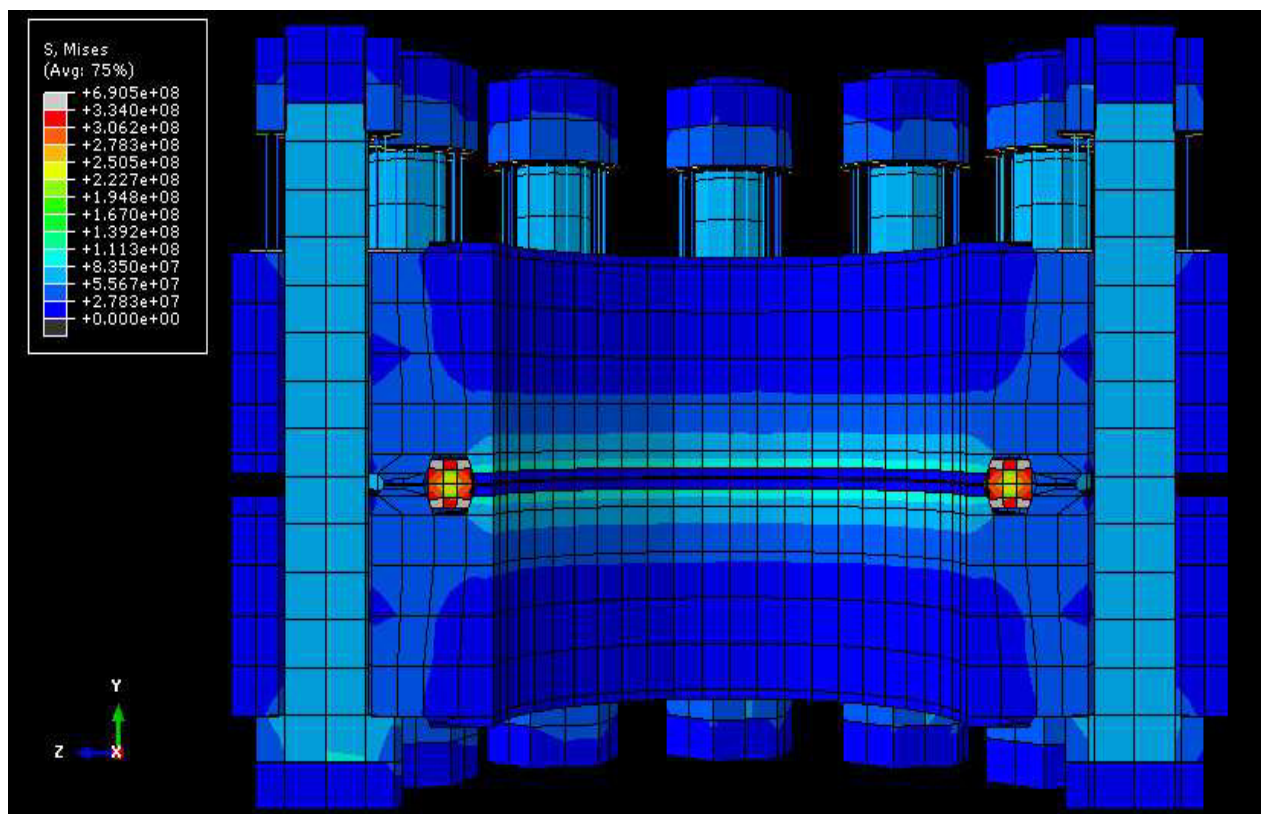


Figura 46 - Tensão de Von Mises na Conexão Flangeada com Arruela de 50mm

- Arruela de 60mm

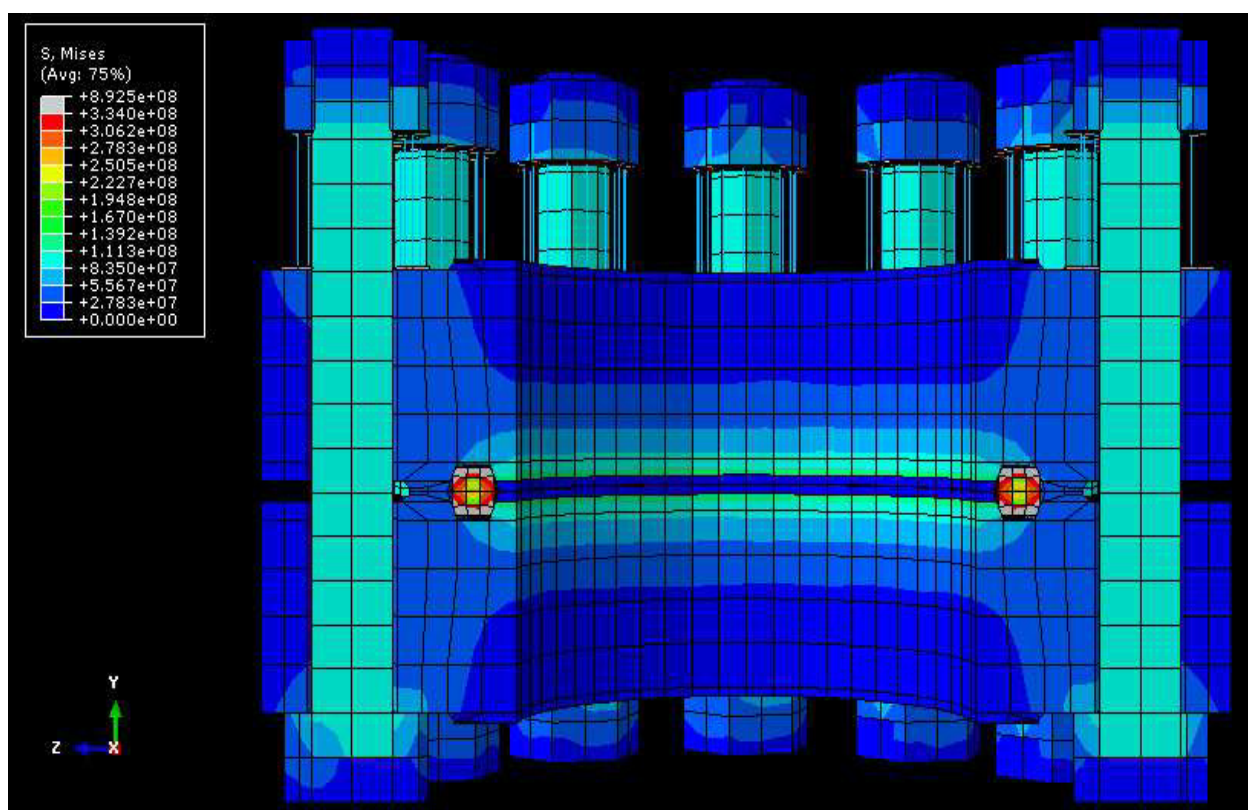


Figura 47 – Tensão de Von Mises na Conexão Flangeada com Arruela de 60mm

- Arruela de 70mm

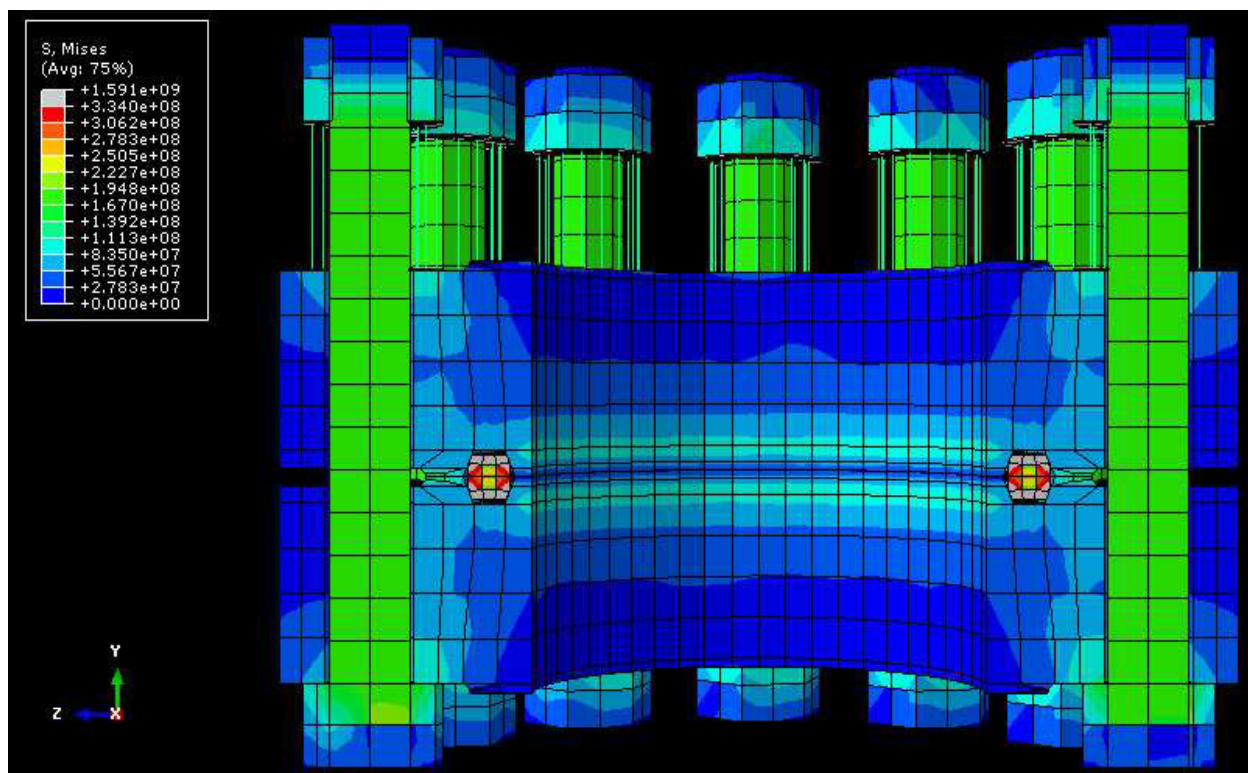


Figura 48 – Tensão de Von Mises na Conexão Flangeada com Arruela de 70mm

- Arruela de 80mm

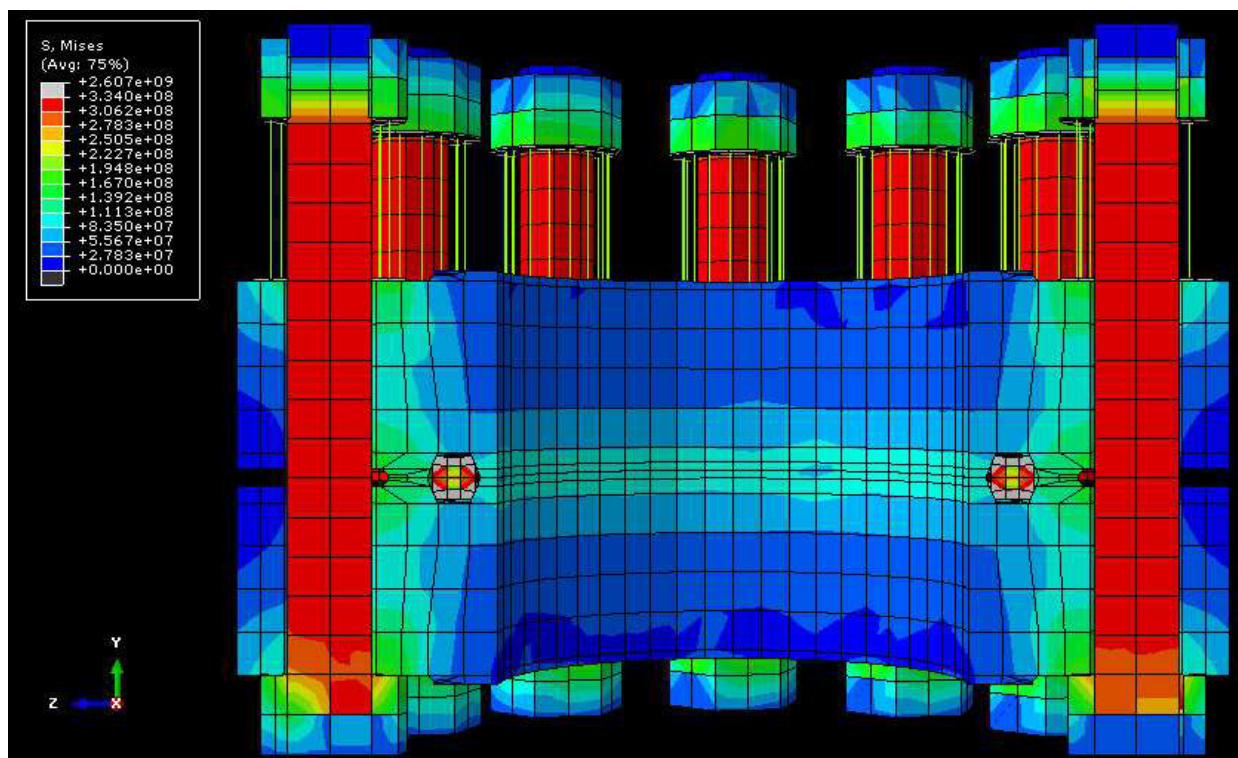


Figura 49 – Tensão de Von Mises na Conexão Flangeada com Arruela de 80mm

- Arruela de 85mm

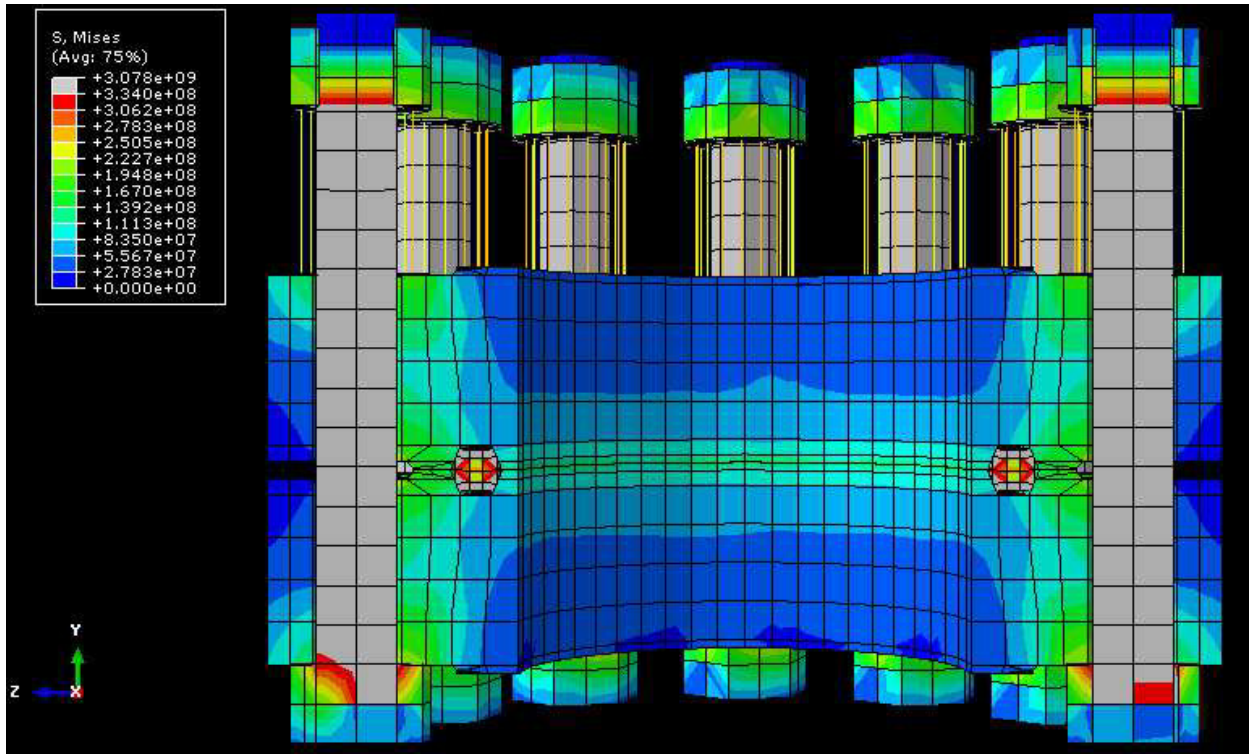


Figura 50 – Tensão de Von Mises na Conexão Flangeada com Arruela de 85mm

Observa-se na figura 51 o gráfico de tensão nos parafusos em função do tamanho das arruelas:

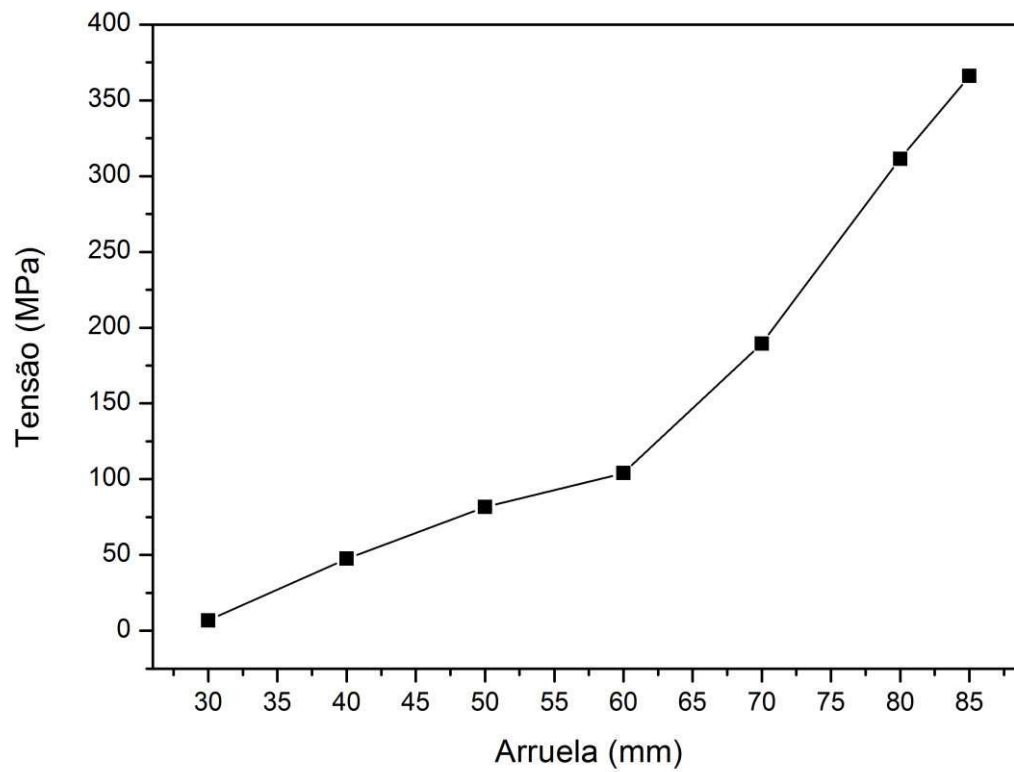


Figura 51 – Gráfico de Tensão nos Estojos vs. Espessura das Arruelas

Há uma grande diferença observável no comportamento da curva de tensão dos estojos, no ponto onde a arruela tem espessura equivalente a 60mm. Isto se deve ao fato deste ponto corresponder à espessura necessária para que os ressaltos dos flanges se toquem. A princípio, na forma não deformada, a altura do anel excede a do espaço no rasgo que este pode ocupar, fazendo com que os ressaltos dos flanges se distanciem cerca de 3,14mm. A figura 52, (a) e (b) representam em corte o anel no flange, antes e depois da deformação, quando os ressaltos se tocam:

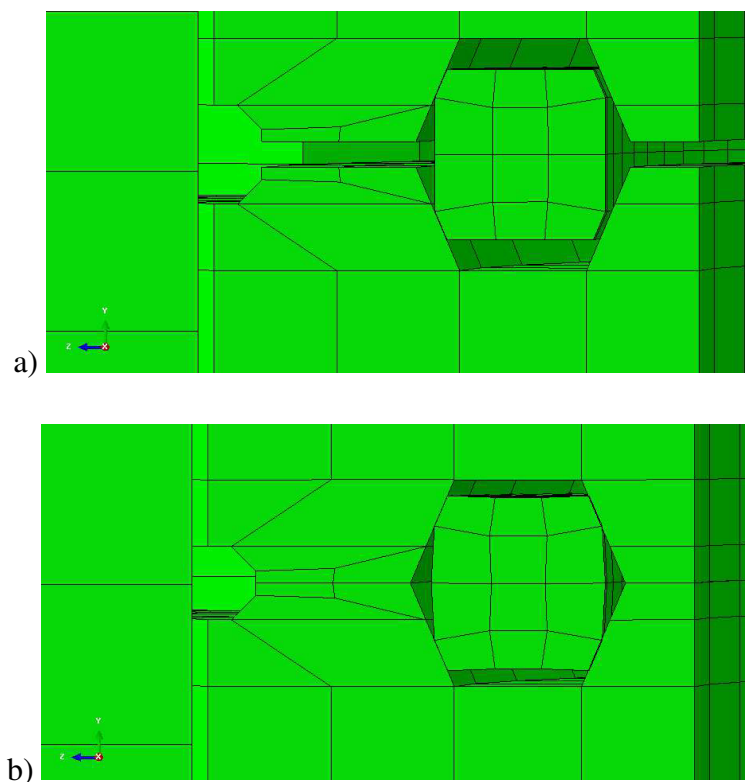


Figura 52 – Ilustrações em Corte do Anel no Flange a) Antes da Deformação b) Após a Deformação

Assim, em um primeiro momento, a expansão nas arruelas reduz o tamanho deste espaçamento até que os ressaltos das faces dos flanges se toquem. Antes disto, a carga nos estojos não é muito elevada devido à facilidade de deformação do anel, que deve ser composto por material mais macio do que o corpo dos flanges. A partir do momento em que estes entram em contato, a expansão das arruelas passa a não só ser acomodada pela deformação plástica no anel, mas pela deformação de todos os componentes do sistema, o que leva a um maior carregamento nos parafusos.

Percebe-se pelo gráfico da tensão nos parafusos em função da espessura das arruelas que a carga de 45T é atingida a um valor ligeiramente maior que 80mm. Logo, testes com espessuras adicionais de arruelas deveriam ser conduzidos para que se pudesse atingir a carga alvo. Como o gráfico, a partir do momento em que os ressaltos entram em contato, apresenta grandes variações de tensão para pequenos

incrementos de espessura nas arruelas, optou-se por se executar um teste adicional com uma arruela de 85mm, metade do incremento utilizado anteriormente, de 10mm.

Verificou-se assim que a carga com esta arruela excede o valor de 45T. Como a curva mostrou-se bem comportada na região da carga alvo, determinou-se, por extrapolação linear, que a arruela necessária para que a carga nos estojos seja ideal teria espessura de 82mm. Quanto aos estojos, o comprimento para comportar esta espessura de arruela deve corresponder a cerca de 365mm, 60mm a mais do que os estojos tradicionalmente empregados em flanges de 8 polegadas.

5.4 Determinação da Temperatura de Trabalho

Além da espessura da arruela, é importante determinar a temperatura de trabalho do material, que deve ser suficiente para sua transformação completa de martensita para austenita. Isto pois esta transformação garante que a deformação residual obtida no procedimento de pré-carregamento das arruelas seja revertida, proporcionando, assim, a aplicação da tensão alvo nos estojos.

É importante ressaltar que as temperaturas de transformação empregadas no modelo matemático simulado não correspondem às temperaturas adequadas para trabalho em equipamentos submarinos, que corresponde a cerca de 4°C. Este fato decorre de terem-se empregado dados reais de uma liga com memória de forma, fruto de testes experimentais realizados por Tobushi et al.. Isto foi considerado importante para que fosse possível obter uma simulação com o comportamento termomecânico realista deste tipo de material. Além disso, podem-se alterar as temperaturas de transição de fase de materiais com memória de forma, adicionando-se elementos na liga à sua composição, de modo a se obterem ligas apropriadas para uma vasta gama de temperaturas de atuação.

O procedimento de expansão das arruelas com a variação da temperatura obtido com a simulação é observado nos gráficos das figuras 53 e 54, de evolução das frações volumétricas com a temperatura, bem como de evolução da deformação, com a fração de austenita.

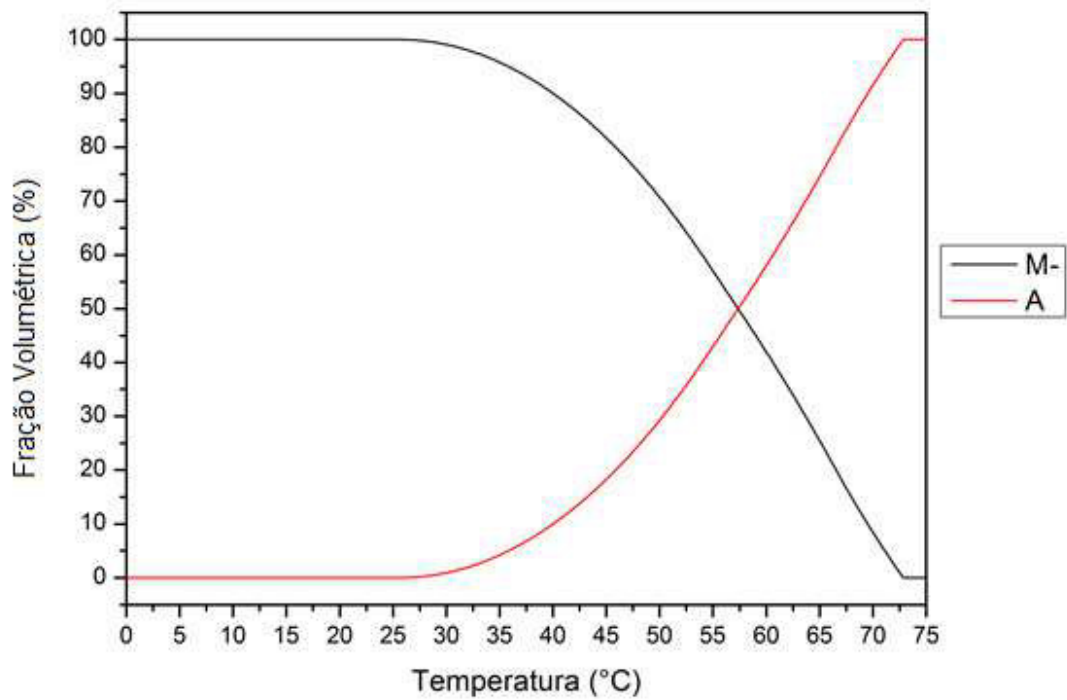


Figura 53 – Gráfico das Frações Volumétricas nas Arruelas vs. Temperatura durante o aquecimento

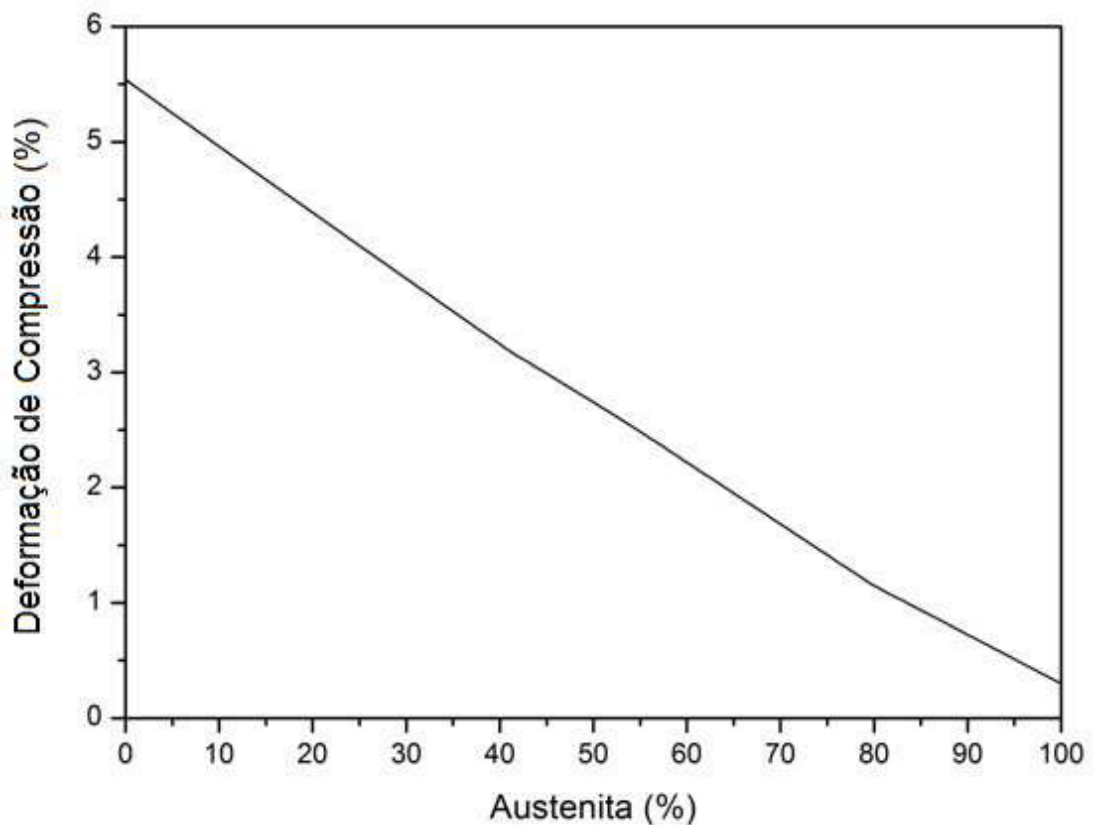


Figura 54 – Deformação na Arruela vs. Porcentagem de Austenita na Liga com Memória de Forma

Em todos os testes realizados, as arruelas foram aquecidas a uma temperatura suficientemente alta para que sua estrutura fosse completamente convertida em austenita. Livre de tensões, a liga com memória de forma empregada inicia a transformação em austenita a uma temperatura de 300K, e termina a 342K.

Entretanto, quando aquecidas no flange, as arruelas encontram-se sob tensão, crescente à medida que aumenta sua espessura. Dessa forma, foi observado que, para diferentes arruelas, altera-se a temperatura de transformação completa.

Para avaliar este efeito, foram realizadas simulações com um fio de liga de memória de forma em que, partindo-se do estado martensítico (M-), aquece-se a estrutura visando a transformação completa em austenita. Adicionalmente à variação de temperatura, uma variação de tensão foi imposta ao fio a partir do momento em que se atingia a temperatura A_s . Assim, reproduz-se, aproximadamente, a combinação de estado de tensão e de temperatura impostos às arruelas em sua recuperação da deformação no flange. Seguem gráficos dos carregamentos simulados, bem como da evolução da fase austenítica em função da temperatura.

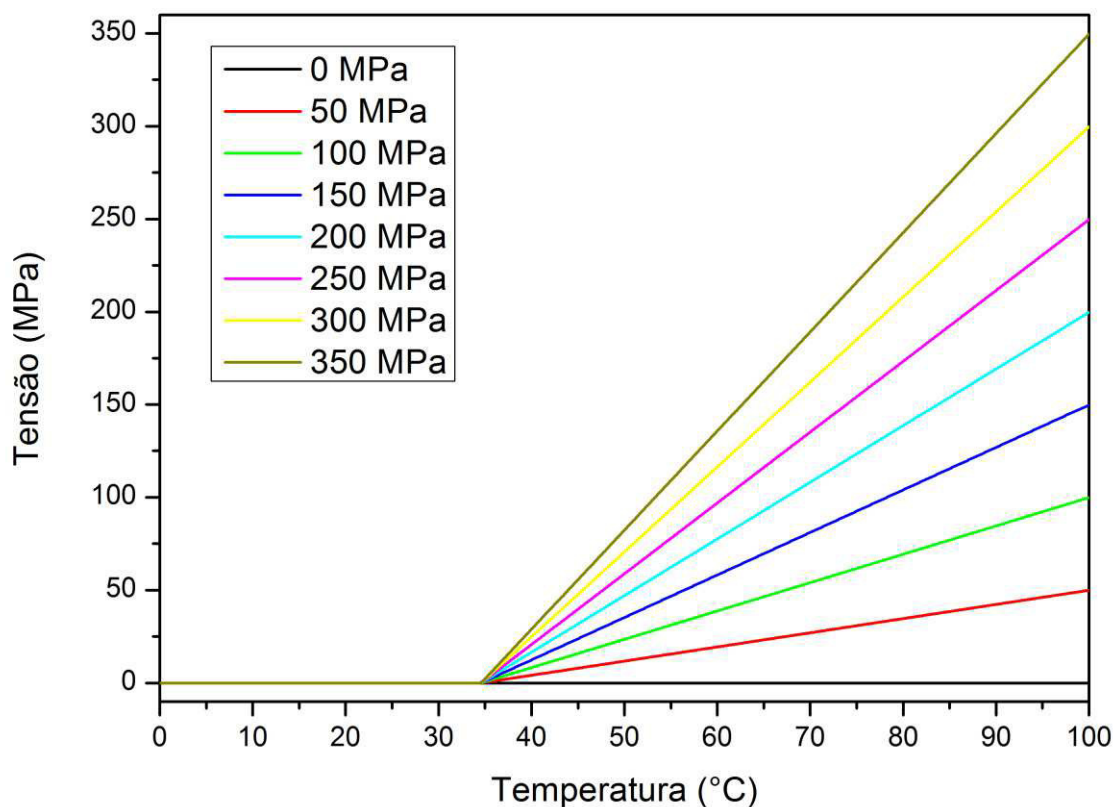


Figura 55 – Gráfico de Tensão vs. Temperatura para diferentes carregamentos simulados

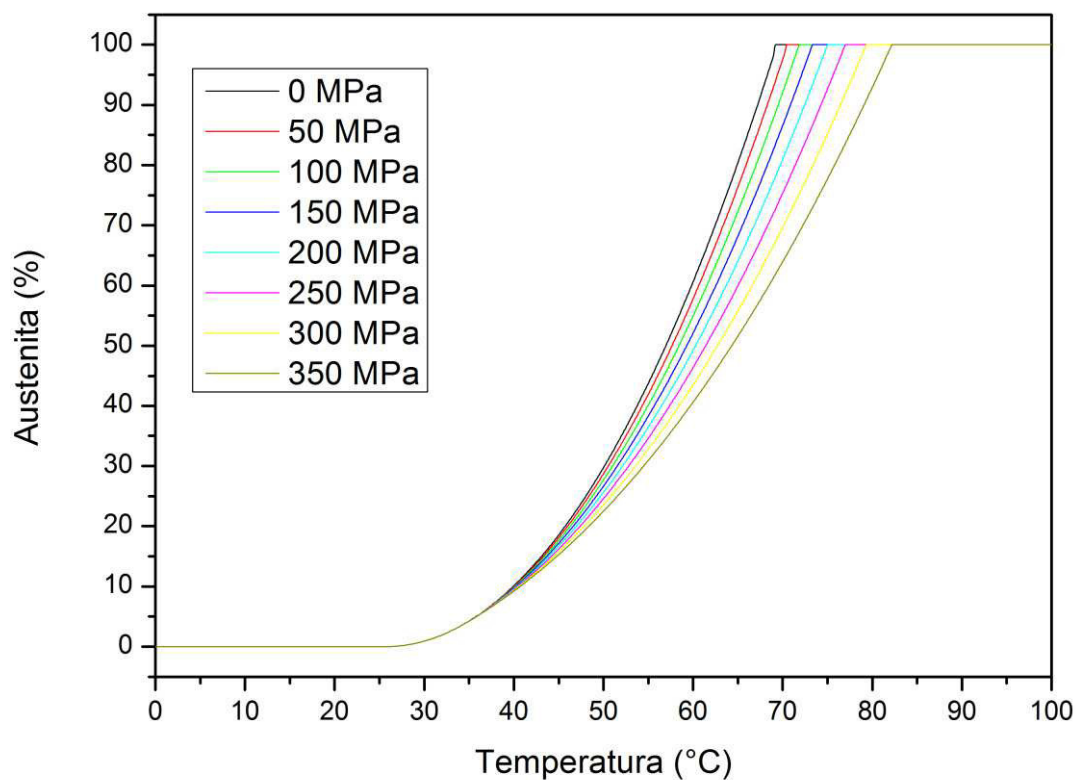


Figura 56 – Fração de Austenita vs. Temperatura para diferentes carregamentos simulados

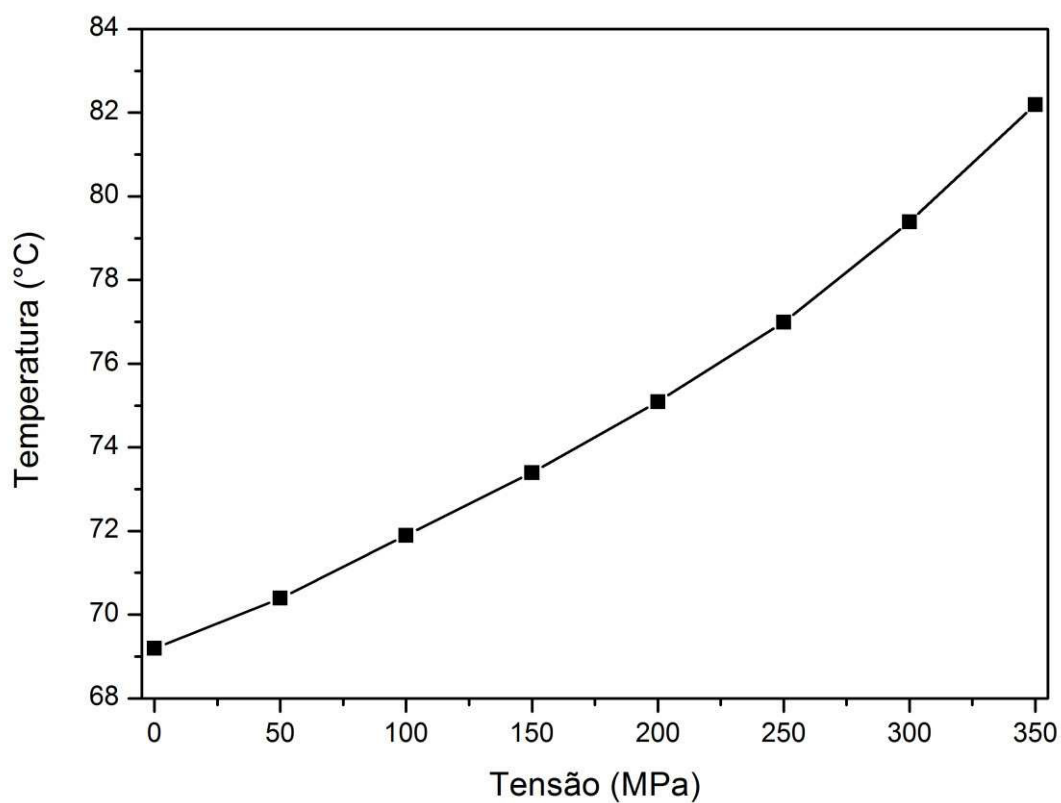


Figura 57 – Temperatura de Transformação Completa vs. Tensão nos Fios

É notável que, embora a começo da transformação em austenita para todos os casos seja a mesma, a temperatura de transformação completa é alterada. Como pode

se observar no gráficos, há uma variação superior a 10°C neste valor entre as simulações executadas.

Portanto, é preciso que, para emprego desta tecnologia, seja determinado exatamente o valor de temperatura exigido para a recuperação completa. Observou-se que, para o caso da arruela de 80mm – que mais se aproxima da carga alvo nos parafusos – pequenas variações de temperatura podem gerar grandes variações nas tensões dos parafusos. Segue gráfico de tensão nos estojos por temperatura para ilustração deste fato:

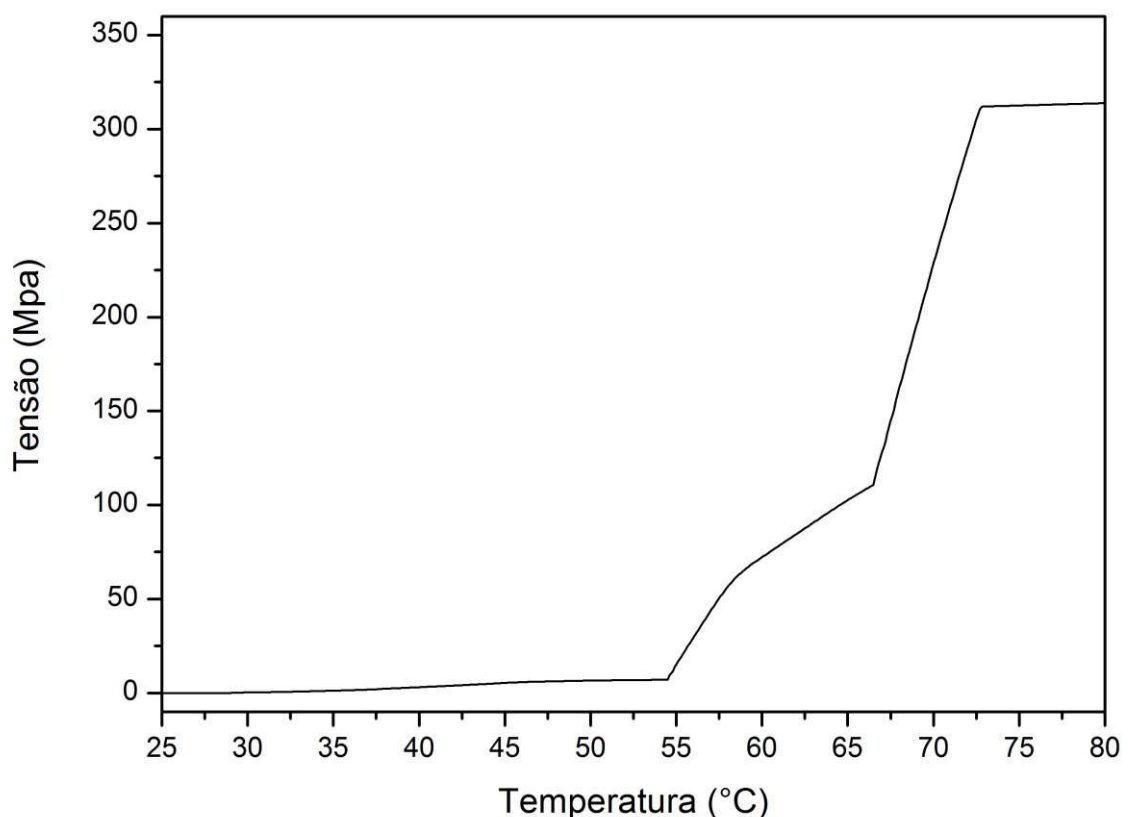


Figura 58 – Gráfico de Tensão de Von Mises nos Estojos vs. Temperatura

A partir da análise do gráfico é possível verificar que no intervalo de 55 a 67°C a tensão sofre uma variação em torno de 100 MPa, que corresponde ao período em que o anel é deformado até conformar-se de acordo com o espaço a ele destinado nas faces do flange. Com este tem material mais macio, percebe-se que a variação de tensão é mais suave neste intervalo em comparação com o subsequente. Já de cerca de 67 a 73 °C, em um intervalo de apenas 6°C, há uma variação de aproximadamente 200 MPa nos estojos, que demonstra a sensibilidade da resposta mecânica a pequenos incrementos de temperatura. Assim, destaca-se a importância de se determinar a temperatura tal que se possa obter a transformação completa e atingir a carga alvo destas estruturas.

No caso da arruela de 80mm, com $3,098\text{E-}3\text{ m}^3$ de seção transversal, a tensão final nos fios é de 220 MPa, esta temperatura equivale a 73°C , superior 4°C à temperatura final, livre de tensões.

5.5 Comparação com o Método Tradicional

Uma vez determinadas a espessura e temperatura mínima de operação para as arruelas, é possível comparar os resultados obtidos de distribuição de cargas nos estojos com os do método tradicional de montagem de flanges.

Foram utilizados para análise valores de distribuição obtidos em testes experimentais realizados no Laboratório de Tecnologia Submarina, em 2008. Estes testes contemplaram os procedimentos de tracionamento dos estojos por torqueamento adjacente e cruzado. A diferença entre estes é a sequência de aperto, conforme indicam as figuras abaixo:

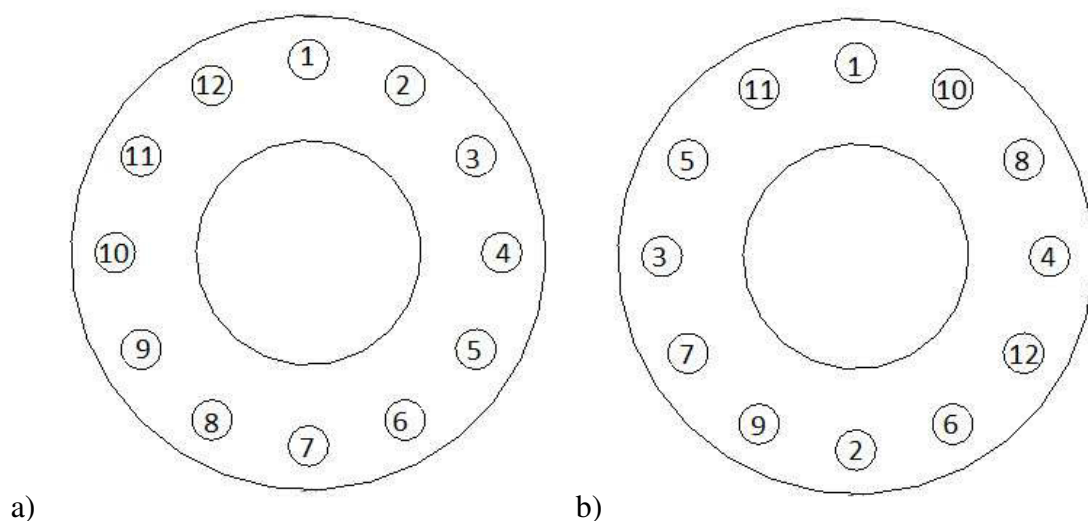


Figura 59 – Sequências de Aperto dos Estojos: a) Adjacente b) Cruzado

Nestes casos, portanto, as cargas são aplicadas aos parafusos individualmente, não existindo a possibilidade de se tracionarem os parafusos simultaneamente. Por outro lado, com o emprego de arruelas com memória de forma, o procedimento de montagem dos flanges é muito menos moroso, fazendo com que exista a possibilidade de aquecimento de mais de uma destas estruturas paralelamente.

Nas simulações numéricas efetuadas, a variação de temperatura imposta às arruelas se deu, para todas, simultaneamente. Embora este caso represente a situação ideal, dada a simplificação do processo de montagem, permite-se que, na prática, seja

obtida uma evolução similar das temperaturas nas arruelas. Entretanto, deve-se levar em consideração que, em uma situação real, pequenas diferenças no tempo de aquecimento das arruelas deve levar a uma distribuição menos regular do que a obtida com a simulação.

Segue tabela comparativa das cargas resultantes em cada estojo, para os casos de torqueamento e o do uso de arruelas com memória de forma. Cabe lembrar que as simulações empregadas para comparação são as com uso da arruela de 80 e 85mm, que mais se aproximaram da carga alvo de 45T. Embora não seja a carga correta, observou-se que, em todos os testes com diferentes arruelas, o desvio padrão das tensões nos estojos não sofreu significativas alterações.

Estojo	Método de Tracionamento dos Estojos			
	Torqueamento Cruzado	Torqueamento Adjacente	Arruelas de SMA de 80mm	Arruelas de SMA de 85mm
	Carga (T)	Carga (T)	Carga (T)	Carga (T)
1	47.46	45.47	42.53	49.66
2	46.38	48.37	42.53	49.71
3	46.73	49.28	42.15	49.76
4	44.59	42.94	42.56	49.64
5	46.14	44.06	42.47	49.76
6	46.51	44.14	42.39	49.74
7	46.29	50.18	42.51	49.58
8	46.17	46.55	42.54	49.55
9	45.7	44.94	42.42	49.79
10	42.98	45.08	42.54	49.27
11	45.39	44.81	42.50	49.77
12	44.15	44.41	42.44	49.76
Desvio Padrão	1.249.291.617	2.269.782.228	0.111857276	0.146237068

Tabela 3 – Comparação das Cargas nos Estojos

Verifica-se que o desvio padrão das cargas nos 12 estojos, no caso do uso das arruelas com memória de forma, é cerca de 10 vezes menor do que o desvio no torqueamento cruzado e 20 vezes menor do que o desvio no torqueamento adjacente. Isto representa uma melhora muito significativa do método proposto em relação ao procedimento padrão, caso seja viável o aquecimento tal qual se simulou.

6 Conclusões

Conexões flangeadas são usadas na indústria do petróleo unindo segmentos de tubulação entre si, e a equipamentos diversos. O procedimento tradicional de montagem de flanges de conectores submarinos, por meio de torqueamento sucessivo ou cruzado dos estojos, leva à uma distribuição de cargas irregular ao longo do flange, o que pode levá-lo à falha. A busca de procedimentos alternativos para montagem deste tipo de conexão é, portanto, fundamental para aumento da confiabilidade nesta estrutura.

Este trabalho propôs a utilização de arruelas com memória de forma como meio de tracionamento dos estojos presentes nos flanges. Para análise da proposta, foi elaborado um modelo numérico para simulação do aperto dos estojos da conexão com arruelas de diferentes espessuras, compostas por liga com memória de forma. Parâmetros de testes experimentais realizados por Tobushi et al., em 1991, foram usados como base para descrição do comportamento do material das arruelas.

A partir das simulações determinou-se que, para que seja atingida a carga alvo nos estojos de 45T, é preciso que sejam empregadas arruelas de 82mm de espessura no flange. Verificou-se também que, para que se comportem estas arruelas, a geometria dos estojos tradicionalmente empregados em flanges de 8” seria modificada. Em vez de 305mm, os estojos devem ter 365mm de comprimento.

Paralelamente, analisaram-se as temperaturas de transformação completa de martensita para austenita das arruelas no flange, processo fundamental para precisão do carregamento dos estojos. Observou-se que, embora as arruelas tenham a transformação iniciada à mesma temperatura, a transformação completa ocorre a cerca de 4°C a mais quando aquecidas no flange, em comparação com o aquecimento livre de tensões. Esta determinação é importante pois a resposta mecânica do material é muito sensível a pequenas variações de temperatura.

Por fim, compararam-se as distribuições de cargas nos estojos obtidas com o método proposto, bem como com os procedimentos tradicionais de torqueamento cruzado e adjacente. Embora as simulações tenham adotado uma sequência de aquecimento idealizada, acredita-se que é viável a obtenção de variações de temperaturas nas arruelas similares às reproduzidas, devido à simplificação na montagem dos flanges implicadas pelo procedimento proposto. Com isso, verificou-se que o desvio padrão dos valores de tensão com o uso das arruelas de memória de

forma foi 10 vezes inferior ao desvio obtido com torqueamento cruzado e 20 vezes menor do que o desvio obtido com o torqueamento adjacente.

6.1 Trabalhos Futuros

Uma série de análises posteriores são importantes para melhor compreensão do uso de arruelas com memória de forma em flanges de conectores submarinos para tracionamento dos estojos. Seguem propostas de estudos futuros:

Estudo da sequência de instalação e de aquecimentos das arruelas presentes no flange, para comparação mais precisa do método proposto com o procedimento tradicional de torqueamento cruzado ou adjacente. As discrepâncias de valores de tensões resultantes nos estojos devem ser confrontados para quantificar as possíveis melhoras obtidas com o novo método. Variações de temperaturas finais das arruelas também podem ser contempladas em experimentos posteriores, em que o aquecimento não ocorra simultaneamente.

Ainda em relação às temperaturas, é importante que sejam estudados procedimentos possíveis para a manutenção das arruelas a baixas temperaturas até o momento de sua aplicação na conexão.

Além disso, testes experimentais para comparação com os resultados obtidos por meio do modelo numérico devem ser realizados. As simplificações e considerações aplicadas ao modelo poderiam, assim, ter seus efeitos avaliados, a partir do confronto das respostas mecânicas da conexão real com a simulada.

Por fim, deve ser analisada a viabilidade de se fabricarem as arruelas sólidas com ligas com memória de forma em escala industrial, do ponto de vista de engenharia e econômico.

7 Bibliografia

- [1] MONTEIRO JR., P. C. C., “Análise do acoplamento termomecânico em ligas com memória de forma”. 2007. 147 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – COPPE, Rio de Janeiro.
- [2] OLANDER, A. J., Am. Chem. Soc., 54, pp.3819-3820, 1932.
- [3] GRENINGER, A. B. & MOORADIAN, V. G., “Strain transformation in metastable beta copper-zinc and beta copper tin alloys”. Trans. AIME, 128, pp. 337-368, 1938.
- [4] KURDJUMOV, V. & KHANDROS, L. G., Dokl. Acad. Nauk. USSR 66, 211, 1949.
- [5] BUEHLER, W. J. & WILEY, R. C. “Nickel-based alloys Technical Report”, 1995.
- [6] BUEHLER, W. J. & WANG, F. E., “A summary of recent research on the Nitinol alloys and their potential application in ocean engineering”. Ocean Eng. 1, pp. 105-120, 1967.
- [7] ULLAKO, K., HUANG, J. K., KANTNER, C., O’HANDLEY & R. C. KOKORIN, V. V., “Large magnetic-field induced strains in Ni₂MnGa single crystals” Applied Physics Letters 69 (13), 1966-1968, 1996.
- [8] LENDLEIN, A., JIANG, H. J. JUNGER, O. & LANGER, R., “Light-induced shape-memory polymers”, Nature, 423, 2005.
- [9] PETRINI, L. & MIGLIAVACCA, F., “Biomedical Applications of Shape Memory Alloys” Journal of Metallurgy, 15, 2001.

- [10] HUAN, W., “Shape memory alloys and their application to Actuators for deployable structures” 1998. 157 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Department of Engineering, University of Cambridge, Cambridge.
- [11] HIROSE, S., IKUTA, K. & UMETANI, Y., “Development of a Shape Memory Alloy Actuator: Performance Assessment and Introduction of a New Composing Approach” Advanced Robotics, Vol 3, pp 3-16.
- [12] TOBUSHI, H., IWANAGA, H., TANAKA, K., HORI, T. & SAWADA, T., “Deformation behavior of TiNi shape memory alloy subjected to variable stress and temperature”. Continuum Mechanics Thermodynamics, pp. 79-93, 1991.
- [13] SENAI, “Tubulação Industrial”, pp. 47-61, 1997.